

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Agrícola

***Utilização de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR como Fonte de Dados
para Modelos Matemáticos de Estimativa da Fitomassa da Cana-de-Açúcar***

Giampaolo Queiroz Pellegrino

Orientador: Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI-UNICAMP) para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Água e Solo

Campinas, Janeiro de 2001

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P364m Pellegrino, Giampaolo Queiroz
Utilização de dados espectrais do satélite
NOAA14/AVHRR como fonte de dados para modelos
matemáticos de estimativa da fitomassa da cana-de-
açúcar / Giampaolo Queiroz Pellegrino .--Campinas, SP:
[s.n.], 2001.

Orientador: Hilton Silveira Pinto.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar. 2. Crescimento (Plantas). 3.
Biomassa. 4. Agricultura – Previsão. 5. Sensoriamento
remoto. 6. Satélites meteorológicos. I. Pinto, Hilton
Silveira. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Titulo em Inglês: NOAA14/AVHRR spectral data as data source for fitomass models

Palavras-chave em Inglês: Sugarcane, Growth (Plants), Biomass, Agriculture –
Forecasting, Remote sensing, Meteorological satellites.

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: Flávio Jorge Ponzoni, Orivaldo Brunini, José Teixeira Filho,
Maria Ângela Fagnani e Jansle Vieira Rocha

Data da defesa: 08/01/2001

Banca Examinadora

Em cumprimento aos requisitos exigidos para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Água e Solo, o presente trabalho foi aprovado em 08/01/2001 pela Banca Examinadora abaixo relacionada:

Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto (Unicamp) Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Flávio Jorge Ponzoni (INPE) Membro da Banca

Dr. Orivaldo Brunini (IAC) Membro da Banca

Prof. Dr. Jansle Vieira Rocha (Unicamp) Membro da Banca

Prof. Dr. José Teixeira Filho (Unicamp) Membro da Banca

Profa. Dra. Maria Ângela Fagnani (Unicamp) Membro da Banca

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas.....	vii
Agradecimentos.....	ix
Dedicatória	xi
Apresentação	xiii
Resumo.....	xv
Abstract	xvii
1. Introdução Geral.....	1
1.1. Hipóteses do trabalho	3
1.2. Objetivos.....	4
2. Análise do Crescimento da Cana-de-açúcar.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Área de estudo.....	6
2.3. Campanhas de Amostragem de Dados	9
2.4. Processamento dos Dados de Campo	15
2.4.1. Preenchimento de Falhas	16
2.4.2. Métodos de Estimativa do Índice de Área Foliar.....	18
2.5. Análise dos Resultados de Crescimento	23
2.5.1. Massa Seca das Folhas, Colmos e Índice de Área Foliar	23
2.5.2. Ajuste de Curvas	29
2.5.3. Estimativa da Massa Seca a partir do Índice de Área Foliar	35
2.6. Conclusões sobre a Análise de Crescimento da Cana-de-Açúcar	38
3. Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais de Campo	41
3.1. Introdução	41
3.2. Método de Estimativa da Refletância.....	42
3.2.1. Radiação Refletida pela Cultura.....	46
3.2.2. Radiação Incidente.....	47
3.2.3. Intercalibração dos Aparelhos para Cálculo da Refletância	52
3.2.4. Resultados da Refletância de Campo.....	54
3.3. Índices de Vegetação Analisados	63
3.3.1. Índices de Vegetação Baseados na Razão de Bandas.....	66
3.3.2. Índices de Vegetação Baseados na Distância da Reta do Solo.....	69

3.4. Estimativa da Fitomassa através dos Dados Espectrais de Campo	72
3.4.1. Correlações entre os Índices de Vegetação de Campo e o Índice de Área Foliar	72
3.4.2. Estimativa da Produção a partir dos Índices de Vegetação de Campo.....	74
3.5. Conclusões Sobre o Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais de Campo	76
4. Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR	79
4.1. Introdução	79
4.2. Processamento das Imagens para a Obtenção da Refletância Orbital	81
4.2.1. Correção Geométrica das Imagens	83
4.2.2. Correção Atmosférica das Imagens.....	87
4.3. Estimativa da Fitomassa por meio dos Dados Espectrais Orbitais.....	91
4.3.1. Determinação da Reta do Solo	91
4.3.2. Correlações entre os Índices de Vegetação Orbitais e o Índice de Área Foliar	92
4.3.3. Estimativa da Produção a partir dos Índices de Vegetação Orbitais	94
4.4. Conclusões sobre o Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR.....	95
5. Conclusões	97
5.1. Conclusões sobre a Análise de Crescimento da Cana-de-Açúcar	97
5.2. Conclusões Sobre Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais de Campo	99
5.3. Conclusões sobre o Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR.....	101
5.4. Conclusões sobre a Hipótese Geral	102
5.5. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	103
6. Referências Bibliográficas	107

Lista de Figuras

- Figura 1. Determinação das coordenadas geográficas de uma das parcelas pertencentes à área de trabalho, usando o aparelho de GPS modelo Pathfinder Basic™ Receivers, fabricado pela Trimble Navigation. 8
- Figura 2. Parcelas escolhidas e limites da área de trabalho em mapeamento digital feito com o aparelho de GPS modelo Pathfinder Basic™ Receivers, apresentado acima..... 8
- Figura 3. Aparelho LI-COR/LI-3000A para medida da Área Foliar, destacando seus três componentes principais..... 20
- Figura 4. Analisador de dossel LI-COR/LAI-2000 e seus principais componentes..... 20
- Figura 5. Evolução da Massa Seca (g/m^2 de terreno) nas parcelas 1 a 5 e M (média das parcelas) ao longo das campanhas..... 27
- Figura 6. Evolução do Índice de Área Foliar (m^2 de folhas/ m^2 de terreno) da cultura da cana-de-açúcar para a parcela M (média das parcelas) ao longo das campanhas.... 28
- Figura 7. Modelos ajustados para Massa Seca dos Colmos (MSC em g/m^2 de terreno) para os três ciclos individualmente. As curvas tracejadas representam modelos hipotéticos, pois foram baseados num número insuficiente de pontos amostrados. Também são apresentados os valores observados. 31
- Figura 8. Modelos ajustados para Massa Seca Total (MST em g/m^2 de terreno) para os três ciclos individualmente. As curvas tracejadas representam modelos hipotéticos, pois foram baseados num número insuficiente de pontos amostrados. Também são apresentados os valores observados. 31
- Figura 9. Modelos ajustados para Massa Seca de Folhas (MSF em g/m^2 de terreno) para os três ciclos individualmente. Também são apresentados os valores observados..... 32
- Figura 10. Modelos ajustados para o Índice de Área Foliar (IAF em m^2 de folhas/ m^2 de terreno) para os três ciclos individualmente. Também são apresentados os valores observados..... 32
- Figura 11. Modelo ajustado para Massa Seca dos Colmos proporcional à Produção máxima do ciclo (MSCprop adimensional) para os três ciclos conjuntamente. 35
- Figura 12. Modelos ajustados para Índice de Área Foliar (IAF) e o logaritmo natural da Massa Seca de Colmos (LN(MSC) - acima) ou o logaritmo natural da Massa Seca Total (LN(MST) - abaixo). São apresentados os valores observados e a curva do modelo Alométrico Linear ou "Potência" (Observado), obtida a partir deles. 36
- Figura 13. Diagrama operacional do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 (Adaptado de LI-COR, 1989). 48
- Figura 14. Medida da Radiação Refletida pela cultura por meio do radiômetro CIMEL-313/22 (A) e da Radiação Incidente por meio do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 (B) com o sensor co-seno (Adaptado de DUGGIN & CUNIA, 1983).49

Figura 15. Medida da Radiação Refletida pela cultura e pela placa de BaSO ₄ por meio do mesmo radiômetro CIMEL-313/22. Uma medida é feita imediatamente após a outra (Adaptado de DUGGIN & CUNIA, 1983).....	51
Figura 16. Intercalibração do radiômetro CIMEL-313/22 (A) e do espectrorradiômetro LICOR/LI-1800 (B) por meio da placa de sulfato de bário (BaSO ₄) (Adaptado de DUGGIN & CUNIA, 1983).	53
Figura 17. Intercalibração de dois aparelhos CIMEL-313/22 (A e B) por meio de duas placas de sulfato de bário (BaSO ₄) (Adaptado de DUGGIN & CUNIA, 1983).	54
Figura 18. Variação da Refletância ao longo da tarde do dia 04 de novembro de 1998, num ponto fixo na parcela 3.	56
Figura 19. Variação da Refletância média ao longo das campanhas para os Filtros 1 (F) e 2 (G) do radiômetro CIMEL-313/22.	62
Figura 20. Espectros idealizados para padrões de Refletância de solo, vegetação verde e Seca (Adaptado de PERRY & LAUTENSCHLAGER, 1984).	64
Figura 21. Localização espacial da usina São Martinho, dos pontos de controle e das cartas IBGE usados no georreferenciamento. As coordenadas geográficas (Latitude/Longitude em °) dos pontos de controle estão especificadas na Tabela 16.85	

Lista de Tabelas

Tabela 1. Valores dos pares de coordenadas UTM (projeção “Universal Transversa de Mercator”), fuso 22 Sul, para cada parcela pertencente à área de trabalho.....	9
Tabela 2. Relação das campanhas realizadas por data, dias após o início do período vegetativo e ciclo a que pertencem.	13
Tabela 3. Relação das regressões ($Y = \text{Intercepto} + \text{Coef1} \cdot X1 + \text{Coef2} \cdot X2$) usadas para o preenchimento de falhas e a consistência dos dados de crescimento. Para os dois primeiros dígitos da coluna Parâmetro, MF representa a Massa Fresca, MS a Massa Seca. Para o terceiro dígito desta mesma coluna, C representa os Colmos e F as Folhas.....	17
Tabela 4. Evolução da Massa Fresca (g), da Massa Seca (g), da Umidade (%) e da Área Foliar (m^2) da cultura da cana-de-açúcar ao longo das campanhas e dentro da parcela 1 e 2. Os valores em itálico foram estimados. Valores medidos em 1 m^2 de terreno.	24
Tabela 5. Evolução da Massa Fresca (g), da Massa Seca (g), da Umidade (%) e da Área Foliar (m^2) da cultura da cana-de-açúcar ao longo das campanhas e dentro da parcela 3 e 4. Os valores em itálico foram estimados. Valores medidos em 1 m^2 de terreno.	25
Tabela 6. Evolução da Massa Fresca (g), da Massa Seca (g), da Umidade (%) e da Área Foliar (m^2) da cultura da cana-de-açúcar ao longo das campanhas e dentro da parcela 5 e M. Os valores em itálico foram estimados. Valores medidos em 1 m^2 de terreno.	26
Tabela 7. Curvas de crescimento para Massa Seca dos Colmos (MSC em g/m^2 de terreno), Massa Seca Total (MST em g/m^2 de terreno), Massa Seca de Folhas (MSF em g/m^2 de terreno) e Índice Área Foliar (IAF em m^2 de folhas/ m^2 de terreno). D representa o número de Dias Após o Corte.....	30
Tabela 8. Definições dos filtros do radiômetro de luminescência CIMEL-313/22 (com os códigos adotados na análise dos resultados entre parênteses).....	46
Tabela 9. Modelos de regressão para estimar medidas de Radiação Refletida pela placa de sulfato de bário para o radiômetro CIMEL-313/22 a partir dos dados de Radiação Global Incidente do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800, para cada filtro. CI é o valor estimado para o aparelho CIMEL e LI o valor da Radiação Incidente medido pelo espectrorradiômetro LI-COR.....	53
Tabela 10. Estatísticas descritivas da Refletância (%) no Filtro 1 (F), nas parcelas 1 a 5, para cada campanha.....	58
Tabela 11. Estatísticas descritivas da Refletância (%) no Filtro 2 (G), nas parcelas 1 a 5, para cada campanha.....	59
Tabela 12. Estatísticas descritivas da Refletância (%) das campanhas, na parcela M, para os Filtros 1 (F) e 2 (G).	60

Tabela 13. Equações de regressão entre os Índices de Vegetação (IV) e o Índice de Área Foliar (IAF). Foram selecionados apenas os IVs com Coeficiente de Determinação (R^2) acima de 0,65.	73
Tabela 14. Parâmetros das regressões lineares múltiplas obtidas para a estimativa da Produção de Massa Seca dos Colmos (MSC) a partir dos dados de Índices de Vegetação (IV) e Dias Após o Corte (D). Equações na forma $MSC = IV * a + D * b + c$	76
Tabela 15. Especificações das passagens dos satélites NOAA, selecionadas para as campanhas realizadas no projeto. São apresentadas observações sobre o motivo para cada imagem ter sido descartada na análise e, para as selecionadas (apresentadas em negrito), o aparelho utilizado na medida da Radiação (Rad.) Direta.	82
Tabela 16. Latitude e Longitude dos pontos utilizados no georreferenciamento das imagens NOAA/AVHRR. Identificadores (ID) de acordo com a Figura 21. (USM = Usina São Martinho).....	86
Tabela 17. Equações de regressão entre os Índices de Vegetação Orbitais (IVOs) e o Índice de Área Foliar (IAF). Foram selecionados apenas os IVOs com Coeficiente de Determinação (R^2) acima de 0,65.	93
Tabela 18. Parâmetros das regressões lineares múltiplas obtidas para a estimativa da Produção de Massa Seca dos Colmos (MSC) a partir dos dados de Índices de Vegetação Orbitais (IVO) e Dias Após o Corte (D). Equações na forma $MSC = IVO * a + D * b + c$	95

Agradecimentos

À Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e à Faculdade de Engenharia Agrícola (Feagri) pela oportunidade de desenvolver esse trabalho como aluno de seu curso de doutorado e pelo apoio essencial e eficiente de sua Coordenação de Pós-Graduação, a coordenadora Profa. Dra. Raquel Gonçalves, sua assistente técnica de direção Ana Paula Montagner e a Técnica Administrativa Marta Aparecida Rigonatto Vechi;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto de pesquisa;

À Copersucar pelo apoio na identificação de áreas aptas e intermediação com as usinas, através de seus engenheiros Jorge Luiz Donzelli e Antônio Celso Joaquim e à Usina São Martinho que, então representada pelo seu presidente Marcelo Ometo e seu gerente operacional Júlio Marcos Campanhão, prontamente aceitou nossa proposta de pesquisa e sempre deu apoio logístico incondicional, incluindo alojamento, laboratório, equipamentos e pessoal. Gostaria de agradecer em especial: à Maria Cecília Raimundo de Castro, assistente de diretoria da usina que sempre organizou tudo para que nossas necessidades fossem atendidas rapidamente, e ao analista químico supervisor do laboratório de análises químicas e fertilidade Antônio Pachir, que sempre nos apoiou prontamente no uso do laboratório e nas pesagens das amostras.

Ao Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura (Cepagri) da Unicamp por todo o apoio e colaboração ao longo desses anos todos em que pudemos trabalhar juntos. Particularmente ao seu diretor, Dr. Hilton Silveira Pinto, pela orientação e motivação para o desenvolvimento deste trabalho, fornecendo total apoio e estando sempre aberto à discussão para a tomada de decisões, permitindo a realização de um trabalho em equipe bastante alegre e produtivo. Ao Dr. Jurandir Zullo Jr., pela co-orientação, colaboração e companheirismo em todos os anos de tese e de Cepagri, sempre apresentando valiosas contribuições para que este trabalho mantivesse a maior qualidade técnica possível. À geógrafa Edilene Carneiro da Silva pela eficiente administração logística e financeira do projeto, cuidando de todos os detalhes para que este se desenvolvesse dentro do planejado. Aos vários companheiros do

Cepagri que participaram direta ou indiretamente das coletas de campo, abnegando-se nesse trabalho árduo e contribuindo com sugestões técnicas ou operacionais: Dr. Rubens Augusto Lamparelli, MSc. Emília Hamada, Eng. Gustavo Coral e o secretário Claudir Rodrigues Cruz. Ainda nessa equipe de campo gostaria de fazer um agradecimento especial ao motorista Joaquim Toledo, que sempre nos conduziu com cuidado e responsabilidade, além de se ter mostrado um excelente operador dos equipamentos radiométricos utilizados, e ao MSc. Carlos Alberto Soares de Almeida, que me concedeu o privilégio de trabalharmos cooperativamente em nossas teses e de lembrar que, apesar da intensidade das luzes das cidades, “não há oh gente oh não, luar como esse do sertão”, mesmo que seja para realizar medidas de radiação termal da cana-de-açúcar sob o tal.

Às três atuais gerações de minha família, pais, irmãos, cunhados, sobrinhos, amigos e - os que provavelmente mais sentem os reflexos das alegrias e dificuldades que um trabalho de tese proporciona - esposa e filhos. Agradeço a vocês todos que sempre me acolheram pacientemente e me deram apoio e razão de ser e avançar.

E a você que não foi explicitamente citado, mas que agora é o leitor, pois mesmo que indiretamente, contribuiu para que este trabalho fosse realizado. Ele foi escrito com o desejo de ser lido por você, divulgar-lhe os conhecimentos obtidos e que estes lhe sejam úteis.

A vocês todos o meu mais que sincero agradecimento: MUITO OBRIGADO!!!

Dedicatória

Procurando encontrar o sentido mais puro da palavra ensinar pode-se chegar a: pôr um sinal (lat *in signare*), marcar. E o sentido que damos a essa palavra hoje claramente destaca o conhecimento como o sinal mais indelével que se pode oferecer a uma pessoa. Por princípio, os professores, mestres e doutores seriam os mais qualificados a desempenhar tal papel. Porém, ao se propor a obter esses títulos, o caminho trilhado é quase sempre um receber contínuo de sinais, ou seja, mais que transmitir sinais essas pessoas se predispõem a colecionar sinais, a apreendê-los, a aprendê-los. Ao fazê-lo porém, corre-se o risco de criar uma coleção apenas para benefício próprio. Esses sinais se tornariam socialmente inúteis, infrutíferos.

Outro dia, de dentro do muito de bom que tem a internet, recebi uma frase de George Bernard Shaw que traduzida ficaria mais ou menos assim: “Se você tem uma maçã e eu tenho uma maçã e nós as trocarmos, então cada um de nós continuará tendo uma maçã. Porém, se você tem uma idéia e eu tenho uma idéia e nós as trocarmos, então cada um de nós terá duas idéias”. Maçãs são bens materiais, o que idéias, conhecimentos, carinhos e afetos não podem ser. Para estes o ensinamento é outro: quanto mais se divide, mais se tem. As pessoas que se dedicam à partilha desses sinais são os verdadeiros professores, mestres, doutores.

Toda a nossa existência nos reserva muito a aprender, mas seu maior ensinamento, o que nos perpetua, é aprender a ensinar, a trocar sinais. Durante a vida encontramos muitos desses doutores, de zero a cem anos, doutos ou analfabetos, mas que aprenderam a ensinar, a partilhar conhecimentos e idéias, carinhos, afetos e compreensão. Aos doutores que me ensinaram a ser o que sou, dedico este trabalho.

Em especial, o dedico aos doutores

Mário, meu pai, e Glória, minha mãe:

mais que dar passos, vocês me ensinaram caminhar!

Ângela, Gianfranco, Giancarlo, Maria Augusta, Silvana e Carla, meus irmãos:

vocês me ensinaram a alegria de compartilhar o caminho!

André, Augusto, Lucas, Enrico, Maísa, Mariana, Marília, Giovanna e Bárbara, meus sobrinhos: vocês me ensinaram a reviver os melhores momentos dele!

Hilton, Jurandir, Reynaldo, Luiz Antônio e Jorge, meus orientadores:

vocês me ensinaram a orientar meu caminho científico e profissional de uma forma ao mesmo tempo responsável, prazerosa, séria e divertida.

Carolina, minha esposa:

you me ensinou que os caminhos também se unem para se criar um futuro onde se divide e desfruta de sinais de afeto e carinho na sua maior plenitude!

Mateus e Pedro, meus filhos:

vocês me ensinaram o magnífico desejo de ensinar tudo o que aprendi e de me perpetuar em vocês!

Apresentação

Este trabalho pretende contribuir para a discussão sobre a aplicação dos dados produzidos por sensoriamento remoto no monitoramento e previsão das produções agrícolas e transmitir didaticamente o conhecimento adquirido com o seu desenvolvimento. Por isso, foi elaborado de forma que os capítulos fossem relativamente independentes, com uma estrutura própria. Essa divisão em capítulos não compromete de maneira alguma a ligação entre eles. Ao contrário, visa deixar claro um tópico antes de passar a outro que dele dependa. Essa estrutura foi adotada pretendendo permitir uma leitura mais fluente e inteligível, seguindo a mesma linha de raciocínio adotada ao longo do desenvolvimento do trabalho. Portanto, a estrutura do texto apresentado aparentemente diverge do padrão de tese. Porém, internamente seguem o padrão para artigos científicos, incluindo introdução, objetivos, material e métodos, resultados e discussão e conclusões individuais, embora não utilizem necessariamente esses nomes

Assim, o Capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema geral deste trabalho e define as hipóteses e os objetivos específicos para que elas pudessem ser testadas. O Capítulo 2 visa esclarecer o comportamento do crescimento da cultura da cana-de-açúcar determinando funções matemáticas de ajuste que o descrevam. Visa, também, obter modelos matemáticos que sejam independentes dos dados espectrais e que permitam estimar, para a cultura estudada, a Produção Instantânea e a Final. Estabelecidos esses pontos, o Capítulo 3 explicita a determinação, por meio de dados espectrais de campo, dos parâmetros necessários à aplicação dos modelos obtidos no Capítulo 2. Como os dados espectrais de campo foram considerados padrão, somente após a constatação de que é possível estimar a Produção por meio deles é que se testou a sua estimativa a partir dos dados orbitais, apresentados no Capítulo 4. Por fim, o Capítulo 5 reapresenta as conclusões individuais de cada capítulo anterior e as integra para obter uma conclusão sobre a hipótese geral do trabalho. Apresenta, também, sugestões para a continuação de estudos na linha deste trabalho.

Ao longo desses capítulos evitou-se adotar siglas, e os nomes das variáveis importantes foram sempre escritos por extenso e iniciando por letras maiúsculas. Sendo assim, não foi

apresentada uma tabela de siglas. As únicas exceções ocorreram para os nomes já consagrados dos satélites e Índices de Vegetação. Os nomes dos aparelhos e as referências bibliográficas foram escritos totalmente em letras maiúsculas.

Resumo

Este trabalho foi desenvolvido na região de Guariba-SP e teve como objetivo principal acompanhar o desenvolvimento fenológico da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*), através de medidas de campo e do uso do satélite meteorológico NOAA14/AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration/ Advanced Very High Resolution Radiometer*), para a obtenção de dados para a utilização em modelos matemáticos de crescimento e de estimativa de Produção.

Para atingir esse objetivo estabeleceram-se alguns passos intermediários:

- definir modelos de crescimento para os ciclos estudados e correlações entre parâmetros biofísicos da cultura, principalmente entre Índice de Área Foliar e Massa Seca;
- avaliar a correlação dos dados espectrais de campo com o Índice de Área Foliar e com a Produção de Massa Seca; e
- após a correção geométrica e atmosférica das imagens orbitais produzidas pelos satélites NOAA, em condições tropicais, avaliar a correlação dos dados espectrais orbitais com o Índice de Área Foliar e com a Produção de Massa Seca.

As atividades de campo foram desenvolvidas na Usina São Martinho (21° 24' 7,0" S, 48° 08' 26,5" O), no município de Guariba, com o apoio do Centro de Tecnologia da Copersucar.

Simultaneamente às passagens dos satélites, foram feitas medidas *in situ* de parâmetros meteorológicos e radiométricos da cultura. Visando a caracterização agrônômica e o acompanhamento do desenvolvimento vegetal da cultura, foram medidas também as Massas Fresca e Seca dos Colmos e Folhas, além da estimativa da Área Foliar. Esses parâmetros foram utilizados em análises de regressão para a obtenção de modelos de crescimento e de estimativa da Produção de Massa Seca, ou Fitomassa da cultura, sendo relacionados aos dados espectrais de campo e do satélite NOAA14/AVHRR. A hipótese básica é que ciclos

futuros da cultura podem ser acompanhados sem a necessidade de um grande número de visitas ao campo, concentrando-se, principalmente, no monitoramento por meio das imagens NOAA, através da determinação de Índices de Vegetação Orbitais.

Foram realizados processamentos das imagens obtidas durante o período de coleta de dados no campo. Esses processamentos incluíram tanto a correção dos valores orbitais, devido aos efeitos atmosféricos, quanto a correção geométrica ou georreferenciamento das imagens. Os parâmetros Índice de Área Foliar e Produção de Massa Seca foram correlacionados entre si e com os Índices de Vegetação de Campo e Orbitais por meio de métodos estatísticos de regressão, para estabelecimento das associações possíveis entre eles. Todos os ajustes de curvas aos dados de crescimento da cultura, ou seja, Índice de Área Foliar e Massa Seca, estimativa da Produção Instantânea e da Produção Final, apresentaram Coeficientes de Determinação acima de 0,90. Regressões lineares múltiplas correlacionando Massa Seca dos Colmos a Índices de Vegetação e Dias Após o Corte apresentaram Coeficientes de Determinação em torno de 0,83 e de 0,95, respectivamente, para os dados de campo e orbitais.

Abstract

Title: NOAA14/AVHRR Spectral Data as Data Source for Sugarcane Fitomass Models

This work was carried out at Guariba-SP region. The main objective was to monitor the phenology of sugar cane (*Saccharum spp*), using field measures and images from the meteorological satellite NOAA14/AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer*), to obtain data for utilization in crop growing models and yield estimation.

To reach this objective some intermediate steps were established:

- to determine crop growing models and the correlation between culture biophysical parameters, mainly for Leaf Area Index and Dry Matter;
- to evaluate the correlation between crop spectral data and Leaf Area Index or Dry Matter Production; and
- to evaluate the correlation between orbital spectral data and Leaf Area Index or Dry Matter Production after making the geometric and atmospheric correction for NOAA14/AVHRR in tropical condition.

These field experiments were carried out in "Usina São Martinho" (21° 24' 7,0" S, 48° 08' 26,5" W), Guariba, São Paulo State, Brazil, with the support of Copersucar Technological Center.

Simultaneously with the satellite passes, meteorological and radiometric field measurements were taken, over the sugar cane plantation. To obtain the agronomic characterization and to monitor the plant growth, Fresh and Dry Matter from the Stem and the Leaves were also measured. These parameters were used for regression analyses to obtain growing and phytomass models that were related to spectral data from the field and from the satellite NOAA14/AVHRR. The basic hypotheses is that the growing season can be monitored without the necessity of a great number of field samplings and based on NOAA images mainly, through the determination of Orbital Vegetation Indices.

Image processing was made during the field-sampling period. This procedure includes the correction of atmospheric and geometric effects. Leaf Area Index and Dry Matter Production were correlated one to another and to Field and Orbital Vegetation Index by means of regression statistical methods to determine the association between them. All curve models for the sugarcane growing data, i.e., Leaf Area Index and Dry Matter Production, instantaneous Yield estimation, and season Yield, presented R^2 above 0.90. Multiple Linear Regression correlating Dry Matter values to Vegetation Indexes and Growing Days presented R^2 around 0.83 and 0.90 for field and orbital data, respectively.

1. Introdução Geral

O uso dos satélites da série NOAA/AVHRR (*National Oceanic and Atmospheric Administration / Advanced Very High Resolution Radiometer*) com fins agrícolas tem tomado impulso, principalmente a partir da última década, para a estimativa do Índice de Área Foliar, da Radiação Fotossinteticamente Ativa e da Biomassa (GUTMAN, 1991; QUARMBY et al., 1993; MASELLI et al., 1993). Para as condições tropicais ainda não existem muitos estudos baseados nessas técnicas.

O grupo de trabalho do Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura, da Universidade Estadual de Campinas (Cepagri/Unicamp), já vem desenvolvendo estudos nessa linha, para a cultura do trigo, desde o início de 1995 (PINTO & PELLEGRINO, 1995; HAMADA et al., 1995; HAMADA et al., 1996; ALMEIDA et al., 1996). Os primeiros trabalhos, desenvolvidos na Cooperativa Holambra II em Paranapanema, no sul do Estado de São Paulo, tiveram como objetivo principal a estimativa da Temperatura da Superfície e da Fitomassa da cultura. Os trabalhos de ALMEIDA (1996) e HAMADA (2000) permitiram ao grupo adquirir experiência na aplicação dos métodos de processamento de imagens dos satélites NOAA. Buscando a continuidade dessa linha de pesquisa, elaborou-se este novo trabalho de aplicação e aprimoramento desses métodos na cultura da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar foi a cultura escolhida para a aplicação desses métodos devido à sua importância no cenário econômico regional e nacional e pela forma de plantio em grandes extensões. A sua área plantada aumentou significativamente com o crescimento da demanda energética e com a crise internacional de energia, no início dos anos 70. Foi quando se deu um novo destaque ao álcool de cana-de-açúcar como um dos principais substitutos dos combustíveis fósseis, através do programa de incentivo governamental, o PROÁLCOOL. Durante esses 30 anos muitas mudanças ocorreram no cenário energético nacional, porém a

cana-de-açúcar ainda hoje se mantém como uma das culturas mais importantes no panorama econômico do país.

A importância da cultura da cana-de-açúcar reforça o interesse na previsão de sua Fitomassa Final. Isso tem sido realizado através de métodos agrometeorológicos relacionando a deficiência hídrica ao longo do ciclo com a diminuição da Produção Final.

Porém, nas últimas décadas, técnicas de sensoriamento remoto também vêm sendo usadas com esse fim, permitindo um monitoramento mais freqüente das condições de campo, sendo aplicadas a estudos da superfície vegetada, ao mapeamento e à identificação das diferentes coberturas do solo, bem como para estimativas de produtividade. O princípio utilizado para o estudo da vegetação por sensoriamento remoto é a existência de relações entre respostas radiométricas de um dossel e os parâmetros que caracterizam o estado de crescimento da planta. As respostas radiométricas são captadas pelos sensores e utilizadas para inferir o crescimento da vegetação. Segundo WIEGAND & RICHARDSON (1990), os dosséis, desenvolvidos em resposta às condições complexas e dinâmicas do local, são monitorados a partir de dados espectrais e suas características são expressas por Índices de Vegetação.

Essa transformação dos dados espectrais em Índices de Vegetação é necessária para minimizar a influência de fatores externos que provocam perturbações nas respostas radiométricas de um dossel, tais como irradiações e reflexões de outros corpos, propriedades óticas do solo e da liteira e ângulo de iluminação e de visada. Vários Índices de Vegetação têm sido propostos pela literatura especializada, buscando minimizar cada vez mais o efeito desses fatores externos à cultura, como descrito no Capítulo 3.

Por meio da utilização desses índices, o sensoriamento remoto se mostra como uma alternativa interessante para se avaliar o desenvolvimento de culturas agrícolas, principalmente as de plantios extensos, como é o caso da cana-de-açúcar. Os dados orbitais têm sido usados, na literatura científica, com o objetivo de se determinar a relação entre a Refletância Espectral e o Índice de Vegetação (GALLO & EIDENSHINK, 1988; GUTMAN,

1987; GUTMAN, 1991; MYNENI et al., 1995) e, a partir deste último, estimar a Produtividade de uma cultura (IDSO et al., 1980, TUCKER et al., 1980 e CONESE et al., 1994).

Os estudos de estimativa da Produção de culturas agrícolas, com aplicação de dados de sensoriamento remoto, tomaram impulso com a utilização de imagens do satélite Landsat. Embora os satélites da série NOAA tenham sido desenvolvidos para aplicações meteorológicas e oceanográficas, seu radiômetro AVHRR possui um canal na região do Vermelho no espectro eletromagnético e outro na do Infravermelho Próximo, que são os mais adotados nos diversos índices de vegetação. Além disso, os satélites meteorológicos, como os da série NOAA, apresentam uma maior resolução temporal (em média, duas vezes ao dia cada satélite) quando comparados aos satélites de recursos naturais, como Landsat e SPOT. Isso aumenta a probabilidade de obtenção de imagens limpas, sem cobertura significativa de nuvens, nos períodos críticos do crescimento da cultura. Porém, essa alternativa somente se torna viável para estudos de áreas extensas, devido à sua baixa resolução espacial. A forma como a cana-de-açúcar tem sido cultivada, em extensas áreas homogêneas chamadas de "tapetes verdes", permite o uso da plataforma NOAA.

1.1. Hipóteses do trabalho

Com base no exposto, definiu-se, como hipótese geral deste trabalho, ser possível estimar a Produção Final da Massa Seca dos Colmos da cultura de cana-de-açúcar a partir dos dados espectrais do satélite NOAA/AVHRR. Como forma de testar essa hipótese geral, este trabalho de tese foi dividido em três passos ou capítulos principais e, para cada um deles, definiu-se uma hipótese específica.

Assim, a hipótese testada no Capítulo 2 foi ser possível prever a Produção Final da cultura de cana-de-açúcar através de modelos estatísticos de correlação baseado em dados de Produção Instantânea, ou Massa Seca dos Colmos, medida um determinado número de Dias Após o Corte. Baseando-se nela, no Capítulo 3 testou-se a hipótese de ser possível estimar a Massa Seca dos Colmos da cultura de cana-de-açúcar a partir de dados espectrais de campo, representados na forma de Índices de Vegetação. Por fim, considerando os dados de campo como padrão de comparação, no Capítulo 4 testou-se a hipótese de que os dados

orbitais analisados, após as correções geométricas e atmosféricas necessárias, tenham comportamento parecido ao dos dados de campo quanto às correlações com o Índice de Área Foliar e com a Produção de Massa Seca de Colmos da cultura de cana-de-açúcar.

1.2. Objetivos

Para testar essas hipóteses, o objetivo principal do trabalho foi o de acompanhar o desenvolvimento vegetativo e o acúmulo de Fitomassa da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) por meio de medidas de campo e do uso de dados do satélite meteorológico NOAA14/AVHRR, para o estabelecimento de modelos matemáticos que permitam sua previsão.

Para atingir esse objetivo principal, alguns objetivos ou passos intermediários foram definidos:

- acompanhamento e modelagem do crescimento da cultura por meio de parâmetros agronômicos e meteorológicos coletados em campo como Massa Verde, Massa Seca e Índice de Área Foliar, Temperatura, Precipitação, Umidade do Ar, Radiação Solar Direta;
- acompanhamento do crescimento da cultura por meio de medidas de Refletância e Índices de Vegetação de Campo, correlacionando-os ao Índice de Área Foliar e à Fitomassa Instantânea e à Final;
- aplicação da metodologia de correção geométrica e atmosférica nas imagens produzidas pelo satélite NOAA14/AVHRR, em condições tropicais; e
- acompanhamento do crescimento da cultura por meio de medidas de Refletância e Índices de Vegetação Orbitais, correlacionando-os ao Índice de Área Foliar e à Fitomassa Instantânea e à Final, permitindo sua previsão com um número menor de visitas ao campo.

2. Análise do Crescimento da Cana-de-açúcar

Analisou-se o crescimento da cana-de-açúcar durante três ciclos por meio do monitoramento no campo da Massa Fresca e Seca de Colmos e Folhas, além do Índice de Área Foliar. A partir desses dados, determinaram-se os modelos de regressão que melhor descrevem a sua evolução. Obtiveram-se, também, modelos que descrevem a relação entre a Produção de Massa Seca e o Índice de Área Foliar e entre a Massa Seca de Colmos e os Dias Após o Corte, como forma de poder prever a Produção Final da cultura.

2.1. Introdução

O conhecimento prévio dos resultados das produções agrícolas tem sido buscado com grande interesse por setores da economia e da política nacional e internacional. Com ele se beneficiariam agricultores e investidores, na expectativa de prever os lucros obtidos com a Produção e o comportamento do mercado futuro, e planejadores e governantes, procurando adotar medidas de interesse social e de políticas públicas que permitissem uma melhor distribuição e um melhor controle do abastecimento desses produtos (IPPOLITI-RAMILO, 1999). Porém, diante de um objetivo geral de tal porte, é preciso estabelecer metas de curto prazo que permitam atingi-lo por meio da associação de técnicas já consagradas aos novos avanços tecnológicos. Isso já tem sido feito nas últimas décadas, principalmente com o auxílio dos vários tipos de satélite postos em órbita ao longo desses anos. Grandes avanços no planejamento agrícola e ambiental têm sido possibilitados pelas técnicas de sensoriamento remoto e já se vislumbra ultrapassar novos limites com os novos satélites de altíssima resolução espacial.

Provavelmente, o primeiro passo a ser dado, na direção da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no acompanhamento ou monitoramento da evolução de uma cultura de interesse e da sua Produção Final, é buscar uma compreensão do seu ciclo de vida ou

produtivo, o que pode ser obtido por estimativas de campo da Produção de Massa Verde ou Seca de uma comunidade vegetal, ou seja, de sua Fitomassa e, ainda, de seu Índice de Área Foliar. Como exemplos de trabalhos visando analisar o crescimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, independentemente da utilização do sensoriamento remoto, pode-se citar os realizados por BARBIERI et al. (1979), MACHADO (1981), FUNCAMP (1983), ALFONSI et al. (1987), MACHADO (1987) e TERUEL (1995).

Alguns dos modelos apresentados nesses trabalhos procuram determinar o crescimento da cultura da cana-de-açúcar por meio de análise detalhada dos processos biofísicos envolvidos, buscando ser a expressão matemática destes. Porém, normalmente necessitam de uma grande quantidade de dados de entrada e de parâmetros a serem ajustados, tornando sua utilização geral muitas vezes inviável. Outro tipo de modelo é o funcional, que usa a análise estatística de regressão para estabelecer relações empíricas entre a Fitomassa produzida e parâmetros meteorológicos ou cronológicos, expressas por meio de funções matemáticas que representam as correlações existentes entre as variáveis em foco.

Neste capítulo, utilizou-se este último tipo de modelo pela sua simplicidade e conseqüente aplicabilidade. Porém, longe de procurar ser uma análise detalhada e exaustiva do crescimento da cultura no período de estudo, o objetivo principal aqui foi determinar modelos de ajuste que fossem capazes de descrever satisfatoriamente a evolução das Massas Verde e Seca e do Índice Área Foliar ao longo dos três ciclos analisados. Avaliou-se, também, a possibilidade de se estabelecer um modelo geral de previsão de safra baseado em parâmetros que normalmente são obtidos para a cultura, e a relação existente entre o Índice Área Foliar e a Produção de Massa Seca. Nesta última relação, enfoque especial foi dado ao Índice Área Foliar, pois este pode servir de elo entre os Índices de Vegetação de Campo e Orbital, discutidos nos Capítulos 3 e 4, e a Produção de Massa Seca.

2.2. Área de estudo

Embora a análise de crescimento não exigisse tais especificações, o interesse na estimativa de Fitomassa por meio da utilização do satélite meteorológico NOAA14/AVHRR

fez com que a área para a realização das medidas de campo fosse escolhida procurando atender ao máximo os seguintes critérios:

- área com dimensões (aproximadamente 3km x 3km) compatíveis com a resolução espacial NOAA, permitindo produzir um elemento mínimo de imagem (*pixel – picture element*) sem influência do entorno;
- mesma variedade e mesmo plantio, evitando variações devidas a fatores genéticos;
- manejo, topografia plana e tipo de solo uniformes; e
- bordadura com a mesma cultura.

Com o auxílio dos engenheiros da Copersucar, escolheu-se uma área totalizando 694,41 ha, com manchas de solo do tipo Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho Escuro, cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum sp*), variedade RB83-5486, ciclo de aproximadamente doze meses, espaçamento de um metro entre linhas, colheita mecanizada e localizada na fazenda São Bento Velho, de propriedade da Usina São Martinho no Município de Guariba, SP (21° 24' 7,0" S, 48° 08' 26,5" O). Essa área atendeu satisfatoriamente a todas as exigências acima.

Embora a área fosse bastante homogênea, ela foi percorrida para se detectar sua variabilidade interna e diferentes padrões de crescimento, analisados visualmente. Com base nas diferenças observadas, foram definidas cinco regiões dentro da área de estudo, tendo sido, as medidas, sempre tomadas na área próxima ao ponto central de cada região. Assim, ao longo deste capítulo, essas áreas próximas ao ponto central de cada região foram chamadas de “parcelas”, numeradas de 1 a 5 e utilizadas para compor um valor médio para a área de estudo, chamado de “parcela M”. As coordenadas geográficas de cada uma das áreas de amostragem, ou Parcelas, foram determinadas usando um aparelho de GPS modelo *Pathfinder BasicTM Receivers*, fabricado pela *Trimble Navigation* (Figura 1). A Tabela 1 mostra os valores das coordenadas UTM para cada parcela.



Figura 1. Determinação das coordenadas geográficas de uma das parcelas pertencentes à área de trabalho, usando o aparelho de GPS modelo Pathfinder Basic™ Receivers, fabricado pela Trimble Navigation.

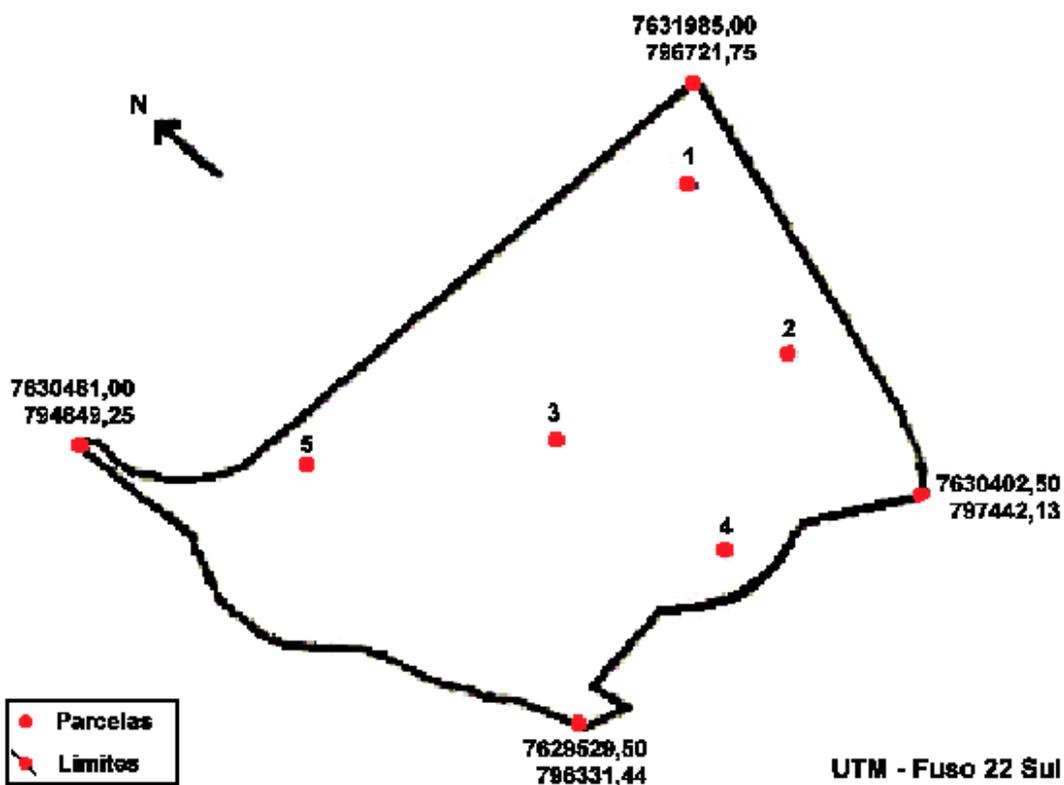


Figura 2. Parcelas escolhidas e limites da área de trabalho em mapeamento digital feito com o aparelho de GPS modelo Pathfinder Basic™ Receivers, apresentado acima.

Tabela 1. Valores dos pares de coordenadas UTM (projeção “Universal Transversa de Mercator”), fuso 22 Sul, para cada parcela pertencente à área de trabalho.

Parcela	Longitude (UTM)	Latitude (UTM)
1	7631608,64	796551,06
2	7630926,93	796879,29
3	7630681,83	796498,01
4	7630255,35	796975,54
5	7630607,63	795501,54

O mapeamento digital da área de trabalho foi feito percorrendo-a em todo o seu perímetro, utilizando o mesmo aparelho de GPS mostrado na Figura 1. Foram definidos os seus limites e as coordenadas geográficas de seus quatro vértices principais, que estão representadas, na Figura 2, em valores UTM para o fuso 22 - hemisfério Sul. A Figura 2 mostra ainda o mapa digital obtido, bem como a localização de cada uma das cinco parcelas escolhidas.

2.3. Campanhas de Amostragem de Dados

Durante o período de amostragem, foram realizadas quatorze campanhas para as quais foram realizadas medidas das características agronômicas e meteorológicas da área de estudo, além da Refletância do dossel e da Radiação Direta Incidente, usadas nos capítulos seguintes. Devido ao maior interesse nas passagens do satélite, procurou-se adotar um itinerário que foi utilizado ao longo do projeto para a coleta de dados no campo, percorrendo os carregadores dentro da área de trabalho, iniciando as medidas numa ordem crescente de número de parcela, começando pela de número 1 e finalizando com a parcela de número 5. O planejamento da coleta de dados no campo foi feito de tal modo que as medidas na parcela 3 fossem feitas simultaneamente à passagem do satélite. Assim, essa parcela foi considerada como parcela central na amostragem e representativa das condições médias da

cultura naquela fase. Por essa razão, deu-se preferência para medir a Radiação Direta Incidente e a Refletida pelo dossel no horário das passagens na parcela 3.

Embora as medidas para o acompanhamento do crescimento da cultura, ou seja, Massas Fresca e Seca e Índice de Área Foliar, fossem independentes do horário de passagem do satélite, por serem propriedades da superfície vegetal, elas foram adaptadas ao itinerário descrito acima para permitir que todas as medidas fossem feitas nos dias de passagem do satélite, evitando a necessidade de uma nova campanha exclusiva para as medidas agrônômicas. As parcelas 1, 2, 4 e 5, por sua vez, não foram menos importantes, visto que foram utilizadas como repetições para as medições realizadas na parcela 3 e ajudaram a compor os valores finais de uma parcela imaginária, chamada aqui de parcela M, que representou o *pixel* das imagens orbitais, conforme descrito no Capítulo 4.

Durante as campanhas, portanto, em cada uma das cinco parcelas de amostragem, a coleta de dados¹ procurou seguir a forma descrita na seqüência abaixo:

- Chegada à Usina São Martinho;
- Visita ao campo para avaliação do estado da cultura e do trajeto a ser percorrido durante a coleta;
- Preparação do equipamento para a passagem diurna do satélite NOAA14 (10h-11h);
- Coleta de dados nas passagens diurnas do satélite NOAA14 (12h30min-17h30min):
 - **Umidade Relativa, Temperatura e Precipitação:** as Temperaturas de Bulbo Seco e de Bulbo Úmido foram tomadas uma única vez para cada parcela, na altura do topo da cobertura vegetal, utilizando um psicrômetro de aspiração fabricado pela RÖSSEL MESSTECHNIK. Os valores médios desses parâmetros foram calculados e usados nas estimativas dos valores de Umidade Absoluta e Relativa do ar. Foi

¹ Embora este capítulo se concentre apenas na análise de crescimento da cultura, todos os tipos de medidas realizadas foram citados para que se pudesse ter uma noção completa das atividades de campo.

usado o método analítico para o cálculo desses parâmetros, conforme descrito em VIANELLO & ALVES (1991). Os dados de Temperatura e Umidade Relativa do ar medidos no abrigo meteorológico, bem como os dados de Precipitação, também foram coletados por aparelhos registradores. Em princípio, esses dados foram tomados apenas para a avaliação das condições meteorológicas e, para isso, também se dispôs dos dados do posto oficial do Instituto Agrônomo de Campinas, em Ribeirão Preto. Esses dados foram utilizados na correção atmosférica das imagens Landsat descrita no Capítulo 4 e na análise sobre a germinação no primeiro ciclo apresentadas neste Capítulo 2.

- **Pressão Atmosférica:** A medida da Pressão Atmosférica na cultura foi tomada uma única vez por parcela utilizando um barômetro da marca FISHER. Esses dados de Pressão foram utilizados nos cálculos realizados para a correção atmosférica das imagens, apresentada no Capítulo 4.
- **Refletância da cultura:** estimada pelo método da placa de sulfato de bário, descrito no Capítulo 3.
- **Radiação Direta Incidente:** medida por meio do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 e/ou com um Fotômetro CIMEL, como descrito no Capítulo 4.
- **Índice de Área Foliar:** por ser considerado o parâmetro mais importante para a correlação entre os dados de campo e as imagens de satélite, foi estimado por três métodos diferentes, com o intuito de testar as vantagens operacionais de cada um e as inter-relações existentes, como forma de sugerir alternativas para a tomada desse parâmetro da cultura. Esses métodos estão descritos no item 2.4.2.
- **Massa Verde e Massa Seca:** colhida em 1m^2 , sem a presença de folhas secas, e levada ao laboratório para pesagem e secagem em estufa a 75°C até peso constante.
- **Umidade do Solo:** estimada pelo método gravimétrico com amostras coletadas a 20cm, 40cm e 60cm e armazenadas em recipientes apropriados e vedados, que foram levados ao laboratório para pesagem e secagem em estufa a 115°C . Assim como a Umidade Relativa do ar, em princípio, esses dados foram tomados apenas

para a avaliação das condições hídricas do solo e poderão ser utilizados em análises futuras.

- Volta à Usina São Martinho para a **processamento em laboratório** do material coletado (21h-02h);
 - separação da Massa Foliar e de Colmos.
 - medida da Área Foliar por meio do medidor de área foliar de esteira LI-COR/LI-3000A;
 - pesagem da Massa Verde das Folhas e dos Colmos;
 - pesagem das amostras de solo úmido;
 - secagem da Massa Verde e do solo em estufa (a 75°C e 115°C, respectivamente) para obtenção de sua Umidade pelo método gravimétrico;
- Repetição das coletas das passagens diurnas e do processamento em laboratório no dia seguinte.

Essas campanhas ocorreram durante três ciclos da cultura de, aproximadamente, um ano cada. O primeiro ciclo observado iniciou-se com o corte realizado no dia 10/05/96, porém as medidas de campo só se iniciaram no dia 30/10/96, como mostra a Tabela 2. Mesmo com esse intervalo de mais de cinco meses, na primeira medida, a cultura ainda não apresentava um desenvolvimento tão significativo, se comparado aos cinco meses iniciais dos outros dois ciclos, pois havia atravessado o período seco e com Temperaturas relativamente amenas de inverno. BISWAS (1986), em um informe sobre a agrometeorologia da cana-de-açúcar, afirma que a Temperatura é, provavelmente, o fator mais importante durante todo o ciclo da cultura, porém seu efeito é ressaltado na germinação, onde o ponto ótimo está entre os 28°C e 33°C. Segundo o autor, no oeste da Índia, agricultores afirmam que não há problemas na germinação com Temperaturas acima dos 22°C, embora a taxa de germinação se incremente entre 26°C e 30°C. Em sua breve revisão, BISWAS (1986) cita SUBBA RAO & PRASAD (1960) que apresentam valores entre 20°C e 32°C para a Temperatura ótima de germinação. Cita também HUMBERT (1968) que afirma que o período de germinação se alonga quando a Temperatura está abaixo dos 20°C. BARBIERI et al. (1979) apresentam o valor de 21°C como Temperatura mínima para a germinação da cana de açúcar.

Tabela 2. Relação das campanhas realizadas por data, dias após o início do período vegetativo e ciclo a que pertencem.

Campanha	Data	Dias após Início do ciclo	Ciclo (Início/Fim)
1	30 e 31/10/96	60	1 (01/09/96* a 20/08/97)
2	15 e 16/12/96	106	
3	13 e 14/04/97	225	
4	19/08/97	352	
5	03 e 04/10/97	45	2 (20/08/97 a 14/09/98)
6	23 e 24/06/98	308	
7	17/08/98	362	
8	04 e 05/11/98	52	3 (14/09/98 a 06/10/99)
9	24/11/98	71	
10	25 e 26/01/99	134	
11	28 e 29/03/99	196	
12	26 e 27/05/99	255	
13	11 e 12/07/99	301	
14	25 e 26/08/99	346	
* Observação: embora o corte tenha ocorrido no dia 10/05/96, adotou-se como data do primeiro corte o dia 01/09/96 como justificado no texto acima.			

Com base nesses trabalhos, adotou-se aqui o valor de 22°C para se determinar o período mais provável para a germinação no primeiro ciclo. Isso foi necessário porque o corte precoce, imediatamente anterior ao primeiro ciclo estudado e propiciado pelo desenvolvimento a partir do plantio em fevereiro/março de 95, fez com que a cultura passasse por um período de dormência durante o inverno com Temperaturas médias abaixo dos 22°C. Dessa forma, houve um atraso na germinação desse primeiro ciclo, se comparada à dos outros dois ciclos estudados. Baseando-se nesse fato e para que houvesse possibilidade de comparação entre o comportamento dos três ciclos, optou-se por adotar como data de corte o dia 01/09/96 pois, de acordo com os dados de Temperatura observados na Usina São Martinho e pelo posto da Estação Experimental de Ribeirão Preto do Instituto Agrônomo de Campinas, só a partir de 20/09/96 as Temperaturas médias permaneceram acima dos 22°C. Além disso, as chuvas também se iniciaram a partir do dia

02/09/96, auxiliando na quebra da dormência das gemas vegetativas. Com essa correção foi possível observar uma perfeita sobreposição dos três ciclos, como mostrado nas análises apresentadas ao longo deste capítulo.

O primeiro ciclo se estendeu até o dia 20/08/97, quando ocorreu o segundo corte. As quatro campanhas realizadas nesse período de outubro de 1996 a agosto de 1997, citadas na Tabela 2, já serviram para a coleta dos dados agrônômicos de maneira definitiva, ou seja, já com método bem definido e que permaneceu até as campanhas finais, o que não ocorreu com as medidas de Refletância, cujo método de medida foi alterado com a chegada de um novo aparelho durante o segundo ciclo.

Na campanha de agosto de 1997, porém, a colheita já havia iniciado. Por isso, durante essa campanha, foram tomadas medidas dos parâmetros já descritos acima apenas para três das parcelas, pois a área de estudo já estava sendo colhida e, embora ainda fosse pequena, essa área alterada já tinha atingido a parcela 1 e se dirigia para a região da parcela 4, não havendo condições para a realização de todas as coletas.

O segundo ciclo estendeu-se de 20/08/97 a 14/09/98, data do terceiro corte. Durante esse período foram realizadas apenas três campanhas de forma a permitir um acompanhamento mínimo do desenvolvimento da cultura, pois as medidas de Refletância que apoiariam a correlação com as imagens de satélite, tema central deste trabalho de tese, não puderam ser realizadas por um dano irreparável ocorrido no cabo de fibra ótica do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800. Apenas com a chegada do novo radiômetro CIMEL 312/22 pôde-se retomar as medidas de campo, a partir do dia 23/06/98, parte final do ciclo. Um ponto importante neste ciclo, tanto do ponto de vista da Produção de Massa Seca como do radiométrico, foi a observação de florescimento durante a medida do dia 17/08/98, o que provocou uma sensível queda na Massa Seca dos Colmos e alteração nos Índices de Vegetação obtidos.

Entre os dias 14/09/98 e 06/10/99, já com o método de medida da Refletância de campo bem definido nas duas campanhas anteriores, pôde-se realizar medidas do terceiro ciclo, mais regulares e espaçadas de, aproximadamente, dois meses entre si. Nesse período foram realizadas sete campanhas, conforme apresentado na Tabela 2.

2.4. *Processamento dos Dados de Campo*

Após as coletas de campo, os dados obtidos foram organizados e analisados para verificar sua consistência e a possibilidade do preenchimento de falhas. Essas falhas na coleta de dados ocorreram três vezes durante os dois primeiros ciclos porque ainda em fase de definição e de adaptação do método, as medidas de Refletância nessas campanhas duraram mais tempo que o programado e impediram que se realizassem medidas em todas as parcelas. Durante o terceiro ciclo, houve apenas uma falha no peso úmido das folhas de duas parcelas, por problemas operacionais no laboratório.

Além dessas falhas, a análise de consistência para cada parcela foi feita determinando-se a melhor regressão múltipla entre as parcelas e analisando o comportamento anômalo de uma das parcelas em relação às demais, em uma determinada campanha. Essas análises de regressão entre as parcelas permitiu detectar um erro na medida da parcela 3 na campanha de junho de 98, durante o segundo ciclo. Pôde-se determinar que, por própria influência da equipe de campo nessa parcela, houve um ataque intenso de formigas que prejudicou o desenvolvimento da cana. Embora, ao final da coleta, já se suspeitasse disso, só foi possível observar efetivamente essa influência das formigas após uma análise dos dados de laboratório, quando se optou por descartar as medidas.

Outra inconsistência foi a diminuição da Massa Seca dos Colmos e Total no final do segundo ciclo, na campanha do dia 17/08/98. Teoricamente, essa queda não poderia ocorrer, pois a Massa Seca de Colmos acumulada não deveria ser perdida, pois o corte é feito antes que a cultura atinja a fase de senescência. Porém, esse fato se explica, pois a cultura apresentava florescimento nessa data, estando portanto em fase reprodutiva que consome boa parte da energia armazenada nos colmos. Embora esse valor não tenha sido utilizado para a determinação de modelos de crescimento de colmos, ele foi útil nos modelos que correlacionam Índice de Área Foliar e Produção.

Outra aparente inconsistência detectada foi o peso de folhas nas campanhas de janeiro de 99, na parcela 2, e de julho de 99, na parcela 1. Esses dados apresentaram valor muito alto comparativamente às medidas das outras parcelas, porém eles não foram descartados por

não haver uma justificativa plausível que confirmasse erro de medida, tendo sido mantidos nas análises apresentadas. Essa também foi a decisão tomada quanto ao alto valor da Massa Seca e Total nas parcelas 4 e 5 em 19/08/97.

2.4.1. Preenchimento de Falhas

O preenchimento das falhas e a análise de consistência dos dados basearam-se na comparação entre as parcelas por meio de análises de regressões lineares simples ou múltiplas. O programa usado para essas análises foi o "Statgraphics Plus 6.0" que, embora ainda seja para ambiente operacional DOS, apresenta uma gama variada de opções de análise, atendendo perfeitamente aos interesses de aplicação neste trabalho.

A Tabela 3 fornece as regressões escolhidas de acordo com seus coeficientes de correlação e de determinação, além da coerência com as regressões obtidas entre as parcelas para os outros parâmetros e com as observações de campo. Essa coerência com as outras regressões mostra a existência de um padrão de correlação geral entre as parcelas, ou seja, se uma parcela apresenta boa correlação com outras duas quaisquer para a Massa Fresca das Folhas, teoricamente essas mesmas parcelas também devem se correlacionar para a Massa Seca de folhas, a menos que uma variação significativa na umidade do solo ocorra entre elas. Embora essa coerência não fosse restritiva na escolha de uma regressão, ela foi claramente percebida nos modelos finais escolhidos.

Pode-se observar que as parcelas bem correlacionadas para Massa de Colmos também o eram para Massa de Folhas, com exceção da parcela 4 que se correlacionou melhor com a parcela 3 para colmos e com a parcela 5 para folhas. Mesmo nesse caso, ao se realizar a regressão entre a parcela 4 e a 5 obtiveram-se correlações razoáveis entre elas, com valores de R^2 iguais a 0,8753 para Massa Fresca de Colmos e 0,8995 para Massa Seca de Colmos. Observa-se também que, de maneira geral, os valores de R^2 para as folhas foram piores que para colmos, mostrando uma maior variabilidade para aquele parâmetro.

Tabela 3. Relação das regressões ($Y = \text{Intercepto} + \text{Coef1} \cdot X_1 + \text{Coef2} \cdot X_2$) usadas para o preenchimento de falhas e a consistência dos dados de crescimento. Para os dois primeiros dígitos da coluna Parâmetro, MF representa a Massa Fresca, MS a Massa Seca. Para o terceiro dígito desta mesma coluna, C representa os Colmos e F as Folhas.

Parcela (Y)	Parâmetro	Intercepto	Coef. de X_1	Parcela X_1	Coef. de X_2	Parcela X_2	R^2
P1	MFC	644,3575	0,7306	P3	---	---	0,9240
	MSC	52,2289	0,7847	P3	---	---	0,9704
	MFF	93,3234	0,8768	P3	---	---	0,8345
	MSF	33,8039	0,8969	P3	---	---	0,7731
P2	MFC	340,1853	0,2603	P1	0,8345	P5	0,9259
	MSC	140,6103	0,4524	P1	0,6195	P5	0,9239
	MFF	28,8809	0,5060	P1	0,4847	P5	0,9014
	MSF	7,7500	0,4683	P1	0,5333	P5	0,8777
P3	MFC	-288,4622	0,9141	P1	0,4353	P5	0,9701
	MSC	-19,3089	0,9839	P1	0,3050	P5	0,9908
	MFF	66,1364	0,7029	P1	0,3097	P5	0,8821
	MSF	23,4317	0,6209	P1	0,4043	P5	0,8654
P4	MFC	-260,1533	1,2138	P3	---	---	0,9576
	MSC	4,8063	1,2238	P3	---	---	0,9484
	MFF	176,7943	1,2399	P5	---	---	0,9126
	MSF	54,8273	1,2063	P5	---	---	0,9034
P5	MFF	-59,5810	0,7360	P4	---	---	0,9126

Com base nessas equações, apresentadas na Tabela 3, foram calculados os valores para as falhas nas medidas de Massa Fresca e Massa Seca. Em uma análise visual tentando encontrar uma correlação simples entre parâmetros distintos de uma mesma parcela, pôde-se perceber apenas a existência de boa correlação entre as Massas Fresca e Seca de uma mesma parte da planta, ou seja, a Massa Fresca de Folhas só se correlaciona bem com a Massa Seca de Folhas. Isso era de se esperar pois depende basicamente do teor de água do tecido vegetal. Apesar de a Umidade da planta apresentar uma leve queda nos meses mais secos do ciclo, ela ocorre em todas as parcelas com a mesma tendência. A análise da matriz de correlação simples entre os dados obtidos em campo confirmou os resultados esperados a partir da análise visual.

2.4.2. Métodos de Estimativa do Índice de Área Foliar

Dentre as medidas do desenvolvimento vegetal, deu-se especial atenção ao Índice de Área Foliar, pois como citam WELLES (1990) e WELLES & NORMAN (1991), é um parâmetro de grande interesse em modelos de interceptação da radiação e da Precipitação, produtividade de culturas, evapotranspiração, transporte turbulento e sensoriamento remoto. Portanto, por si só, obter boas medidas do Índice de Área Foliar e boas correlações com os dados de satélite já pode ser considerado como um objetivo importante e é o foco principal deste item.

Neste trabalho, o Índice de Área Foliar representa a área total das faces superiores das folhas verdes existentes em um metro quadrado da cultura da cana-de-açúcar, o que para o plantio realizado na área de estudo, corresponde a um metro da linha de plantio. Portanto, os dados obtidos foram todos convertidos para a unidade m^2 de folha por m^2 de terreno, gerando um valor adimensional.

Nos itens a seguir são descritos os três métodos utilizados para a estimativa do Índice de Área Foliar. Os dois primeiros foram baseados no aparelho de esteira LI-COR/LI-3000A e LI-COR/LAI-2000 e o terceiro em regressão linear. A partir de seus resultados buscou-se estabelecer correlações entre os métodos, sempre tomando como padrão o da esteira.

2.4.2.1. Método da esteira LI-COR/LI-3000A²

Esse aparelho compõe-se basicamente de três partes. A primeira é o sensor propriamente dito, sobre o qual as folhas passam e têm sua área estimada por meio do processo de varredura ótica, praticamente o mesmo utilizado nos *scanners* atuais. A segunda constitui-se de um motor elétrico que aciona a esteira e transporta a folha através do sensor. A terceira e última parte é um armazenador de dados (*data logger*) que guarda os dados em sua memória e, posteriormente, através de uma saída serial, transfere-o a um computador

² O aparelho LI-COR/LI-3000A utilizado para essas medidas pertence ao Centro de Tecnologia da Copersucar e foi gentilmente cedido durante todo o desenvolvimento do trabalho de campo.

pessoal, no qual os dados foram analisados para se obter os valores finais de Índice de Área Foliar.

Esse aparelho mede diretamente a Área Foliar por meio dos sensores óticos, portanto não é um método indireto, de estimativa por modelos teóricos ou empíricos, como os dois outros apresentados a seguir. Por isso, ele apresenta melhor precisão que os outros dois e foi adotado como padrão para a comparação.

A desvantagem desse método é que ele é destrutivo e trabalhoso, pois é necessário o corte e o transporte das folhas, o que é dificultado em culturas como a da cana-de-açúcar por ser de grande porte e cortante. Além disso, o trabalho de laboratório é demorado, pois depende da baixa velocidade da esteira ao passar as longas folhas da cana.

Diante dessas dificuldades, procurou-se testar formas menos trabalhosas e que produzissem bons resultados, visando substituir o método com a esteira por outro mais ágil. Foram testados, então, os dois métodos apresentados a seguir.

2.4.2.2. Método do analisador de dossel vegetal LI-COR/LAI-2000³

O analisador de dossel vegetal (*Plant Canopy Analyzer*) LI-COR/LAI-2000 é baseado na teoria de estimativa dos *Gaps* (lacunas ou espaços vazios) descrita em WELLES (1990), WELLES & NORMAN (1991) e LI-COR (1992). Segundo essa teoria, é possível estimar a porcentagem de cobertura do terreno pelas folhas, ou então, a porcentagem de céu visível através do dossel, e, conseqüentemente o Índice de Área Foliar, por meio de um radiômetro do tipo "olho de peixe", que permite a comparação entre a Radiação Incidente sobre o dossel e a que chega ao seu interior. O sensor usa um filtro restringindo a radiação medida entre 320nm e 490nm, reduzindo assim os efeitos da Radiação Refletida e da Transmitida pelas

³ O aparelho LI-COR/LAI-2000 utilizado para essas medidas pertence ao Instituto Agrônomo de Campinas e foi gentilmente cedido durante todo o desenvolvimento do trabalho de campo.

folhas. Além desse sensor, o aparelho LI-COR/LAI-2000 possui um armazenador de dados compacto que facilita a sua utilização no campo (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**).



Figura 1. Aparelho LI-COR/LI-3000A para medida da Área Foliar, destacando seus três componentes principais.



Desde que se mantenha o cuidado de nivelá-lo a cada tomada da radiação, esse aparelho possui a vantagem de ser muito fácil de operar, muito ágil no campo, permitindo a tomada rápida de várias medidas, além de ser não destrutivo. Porém, deve-se evitar medidas em dias claros e com radiação externa muito alta, sendo preferível medidas em dias nublados ou com o Sol próximo do horizonte. Essa característica é incompatível com o interesse de se obter, ao mesmo tempo, imagens de satélite livres de nuvens, sendo o principal inconveniente desse método neste trabalho. Outro inconveniente é que a necessidade de uma medida externa fica dificultada pela altura da cana, que pode atingir mais de quatro metros, exigindo o uso de escada dentro do plantio da cana.

A equação que melhor correlaciona os valores obtidos por esse método e o da esteira é a seguinte:

$$IAF_{Est.} = 2,724151 * IAF_{LAI}^{(1,099796-1,810299*\log(IAF_{LAI}))}, R^2 = 0,9653 \quad (1)$$

onde, IAF_{Est} é o Índice de Área Foliar estimado pelo método da esteira e

IAF_{LAI} é o Índice de Área Foliar estimado pelo aparelho LI-COR/LAI-2000.

Embora o Coeficiente de Determinação seja muito bom, o modelo matemático obtido por meio do programa AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986) não é uma regressão linear simples próxima à reta 1:1, como as apresentadas por WELLES (1990) e WELLES & NORMAN (1991). Essa necessidade de um modelo mais complexo pode ter sido influenciada pelo fato de as medidas terem sido feitas a pleno Sol e utilizando as capas de restrição de visadas, distorcendo, de alguma forma, a resposta do sensor à Radiação Incidente.

2.4.2.3. Método da regressão linear da Massa Seca de Folhas

Como a densidade e a espessura do tecido foliar mudam pouco, existe grande correlação entre a Massa Seca de Folhas e a Área Foliar. Portanto, em situações em que a Massa Seca de Folhas seja obrigatoriamente amostrada, é possível utilizá-la para a estimativa da Área Foliar. Para tanto é preciso fazer uma análise da Área Foliar estimada por meio da esteira ou de outro método como, por exemplo, usando papel quadriculado transparente sobre as folhas e contando o número de quadrados ocupados pela folha, ou ainda, como utilizado por MACHADO (1981):

$$AF = C * L * FC \quad (2)$$

onde, AF é a Área Foliar estimada;

C e L são o Comprimento e a Largura do Limbo, respectivamente; e

FC é o Fator de Correlação, cujo valor adotado pelo autor foi 0,7.

Por meio desses métodos é possível estabelecer a relação Massa Seca Foliar por Área Foliar e, a partir dela, estimar o Índice de Área Foliar, desde que se façam coletas desses dois parâmetros, ou previamente ao início da execução do projeto, ou mesmo de forma esporádica, ao longo das coletas, como foi realizado aqui.

Neste trabalho, em várias das campanhas, mediu-se a Área Foliar com a esteira para algumas das parcelas, principalmente para a parcela 3 adotada como média representativa da área de estudo, o que foi comprovado por análise de correlação com a parcela M. As medidas abrangeram uma grande amplitude de variação do Índice de Área Foliar, assegurando um bom ajuste por toda a faixa de desenvolvimento foliar da cana-de-açúcar. A equação obtida a seguir apresenta um excelente ajuste e a vantagem de ser extremamente simples. Na prática ela representa apenas um simples fator multiplicativo de correção. Esse fator, também utilizado por MACHADO (1981) para a estimativa do IAF, foi denominado por ele como Área Foliar Específica, sendo dado em m² de folhas/g de folhas.

Por essas vantagens e por estar disponível o valor para a Massa Seca Foliar, essa equação foi preferida ao método anterior para o preenchimento de falhas nas medidas do Índice de Área Foliar, exibidas da Tabela 4 à Tabela 6, apresentadas no item 2.5.1. A equação apresentada a seguir foi a regressão de melhor ajuste obtida.

$$IAF = 0,008874 * MSF, R^2 = 0,9840 \quad (3)$$

onde, IAF é o Índice de Área Foliar estimado em m² de folha/m² de terreno;

MSF é a Massa Seca de Folhas em g de folhas/m² de terreno; e

0,008874 é a Área Foliar Específica em m² de folha/g de folhas.

Em casos onde não se pretende fazer medidas destrutivas, é possível utilizar o ajuste baseado no LI-COR/LAI-2000, que também apresenta coeficientes de correlação e determinação muito bons, apesar da não linearidade da equação obtida.

2.5. Análise dos Resultados de Crescimento

Neste item procurou-se analisar os padrões de crescimento da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum sp*, variedade *RB83-5486*), determinando-se as curvas de melhor ajuste para descrever a evolução do acúmulo de Massa Verde e Seca de Folhas e de Colmos, bem como do Índice de Área Foliar. É importante ressaltar que cada ciclo foi tratado individualmente, relacionando-se os dados obtidos apenas com o número de dias após o corte, de acordo com a Tabela 2, apresentada no item 2.3.

Procurou-se, também aqui, estabelecer as melhores correlações entre a Produção de Massa Seca de Colmos e Total e o Índice de Área Foliar, visto que este último tem se mostrado o parâmetro que tem apresentado melhores resultados na determinação de informações quantitativas da cultura a partir de imagens de satélite (ASRAR et al., 1984; BARRET & GUYOT, 1991; GOWARD et al., 1991; GUTMAN, 1991), o que será buscado nos Capítulos 3 e 4.

2.5.1. Massa Seca das Folhas, Colmos e Índice de Área Foliar

Da Tabela 4 à Tabela 6 são apresentados os dados de Massa Fresca e Seca dos Colmos e Folhas, Umidade e Área Foliar. Esses dados são apresentados por parcelas, expressando melhor o seu comportamento ao longo das campanhas, o que também está representado na Figura 5 e na Figura 6. A parcela M, apresentada no final dessas Tabelas e Figuras, representa o comportamento médio das parcelas nas campanhas. Com base nessa parcela M foram realizadas as análises de regressão para ajuste de curvas por meio do programa AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986) para os dados de Massa Seca de Colmos, Massa Seca Total, Massa Seca de Folhas e Índice de Área Foliar de cada ciclo da cultura, para a parcela M, discutidas no item 2.5.2.

Tabela 4. Evolução da Massa Fresca (g), da Massa Seca (g), da Umidade (%) e da Área Foliar (m²) da cultura da cana-de-açúcar ao longo das campanhas e dentro da parcela 1 e 2. Os valores em itálico foram estimados. Valores medidos em 1 m² de terreno.

Parcela1		Massa Fresca (g)			Massa Seca (g)			Umidade (%)			Área Foliar (m ²)
campanha	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total		
Out/96	736.9	761.2	1498.1	115.9	212.5	328.4	84.3	72.1	78.1	2.0490	
Dez/96	5365.5	1780.6	7146.1	488.5	526.9	1015.4	90.9	70.4	85.8	4.6757	
Abr/97	8523.0	1466.3	9989.3	1749.1	494.7	2243.9	79.5	66.3	77.5	4.3901	
Ago/97	14968.1	1413.6	16381.7	4952.6	501.8	5454.4	66.9	64.5	66.7	4.4530	
Ago/97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Out/97	105.0	117.8	222.8	17.0	28.2	45.1	83.8	76.1	79.7	0.3281	
Jun/98	16818.0	1488.0	18306.0	5182.7	525.3	5708.0	69.2	64.7	68.8	4.8157	
Ago/98	10659.5	904.8	11564.3	3108.2	337.7	3445.9	70.8	62.7	70.2	2.9181	
Set/98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Nov/98	172.3	228.9	401.2	26.2	60.1	86.3	84.8	73.8	78.5	0.5796	
Nov/98	298.7	355.4	654.1	50.2	87.6	137.7	83.2	75.4	78.9	0.7769	
Jan/99	6396.0	1656.0	8052.0	777.5	423.4	1200.9	87.8	74.4	85.1	3.7575	
Mar/99	10407.8	1444.9	11852.7	2267.9	445.2	2713.1	78.2	69.2	77.1	5.7227	
Mai/99	9246.8	1239.0	10485.8	2466.6	383.4	2850.0	73.3	69.1	72.8	3.4023	
Jul/99	14251.8	1256.3	15508.1	4333.5	580.1	4913.6	69.6	53.8	68.3	5.1479	
Ago/99	10206.2	939.2	11145.4	3240.0	318.4	3558.4	68.3	66.1	68.1	2.8253	
Out/99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Parcela2		Massa Fresca (g)			Massa Seca (g)			Umidade (%)			Área Foliar (m ²)
campanha	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total		
Out/96	489.8	442.5	932.3	71.9	120.5	192.4	85.3	72.8	79.4	1.1698	
Dez/96	2330.5	1186.8	3517.3	328.0	256.5	584.5	85.9	78.4	83.4	2.2761	
Abr/97	13449.1	1748.5	15197.6	3665.7	550.2	4215.9	72.7	68.5	72.3	4.8825	
Ago/97	13074.4	1597.6	14672.0	5047.8	549.8	5597.6	61.4	65.6	61.8	4.3656	
Ago/97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Out/97	85.0	154.3	239.3	12.6	36.0	48.5	85.2	76.7	79.7	0.4178	
Jun/98	15401.8	1451.8	16853.6	4418.8	469.4	4888.2	71.3	67.7	71.0	4.1655	
Ago/98	11606.2	1110.5	12716.7	3207.3	386.9	3594.1	72.4	65.2	71.7	3.4330	
Set/98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Nov/98	183.4	243.2	426.6	26.5	65.1	91.6	85.5	73.3	78.5	0.6687	
Nov/98	531.6	560.1	1091.7	86.1	139.4	225.5	83.8	75.1	79.3	1.2371	
Jan/99	5419.0	1937.0	7356.0	767.5	531.8	1299.3	85.8	72.5	82.3	4.7188	
Mar/99	9724.5	1257.4	10981.9	1990.9	384.3	2375.2	79.5	69.4	78.4	3.4103	
Mai/99	17833.1	1490.6	19323.7	4644.7	462.6	5107.3	74.0	69.0	73.6	4.1052	
Jul/99	10158.4	1427.1	11585.5	3734.1	481.8	4215.9	63.2	66.2	63.6	4.2756	
Ago/99	11222.4	542.3	11764.7	3727.6	193.4	3921.0	66.8	64.3	66.7	1.7161	
Out/99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	

Tabela 5. Evolução da Massa Fresca (g), da Massa Seca (g), da Umidade (%) e da Área Foliar (m²) da cultura da cana-de-açúcar ao longo das campanhas e dentro da parcela 3 e 4. Os valores em itálico foram estimados. Valores medidos em 1 m² de terreno.

Parcela3		Massa Fresca (g)			Massa Seca (g)			Umidade (%)			Área Foliar (m ²)
campanha	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total		
Out/96	484.6	576.5	1061.1	76.9	158.5	235.4	84.1	72.5	77.8	1.5454	
Dez/96	3271.4	1375.5	4646.9	379.2	369.9	749.1	88.4	73.1	83.9	3.2828	
Abr/97	10783.6	1565.8	12349.4	2162.5	513.9	2676.4	79.9	67.2	78.3	4.8589	
Ago/97	19605.0	1505.8	21110.8	6244.9	521.8	6766.7	68.1	65.3	67.9	4.2245	
Ago/97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-----	-----	-----	0.0000	
Out/97	93.0	117.6	210.6	13.0	27.9	40.9	86.0	76.2	80.6	0.2913	
Jun/98	21302.4	1435.7	22738.1	6315.2	487.3	6802.5	70.4	66.1	70.1	4.3246	
Ago/98	13885.3	1100.8	14986.1	3856.3	400.6	4256.9	72.2	63.6	71.6	3.5550	
Set/98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-----	-----	-----	0.0000	
Nov/98	306.5	442.3	748.8	41.8	104.9	146.7	86.4	76.3	80.4	1.1263	
Nov/98	338.6	367.8	706.4	50.5	97.6	148.1	85.1	73.5	79.0	1.0491	
Jan/99	7210.0	1649.0	8859.0	886.0	513.2	1399.2	87.7	68.9	84.2	4.5941	
Mar/99	12988.8	1988.5	14977.3	2470.6	592.2	3062.8	81.0	70.2	79.6	5.2553	
Mai/99	15687.4	1399.3	17086.7	3848.2	434.3	4282.5	75.5	69.0	74.9	4.3672	
Jul/99	16109.1	1326.4	17435.5	4918.3	428.9	5347.2	69.5	67.7	69.3	4.0111	
Ago/99	12963.5	845.9	13809.4	4214.9	313.7	4528.6	67.5	62.9	67.2	2.3406	
Out/99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-----	-----	-----	0.0000	
Parcela4		Massa Fresca (g)			Massa Seca (g)			Umidade (%)			Área Foliar (m ²)
campanha	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total		
Out/96	607.1	538.5	1145.6	113.8	185.2	299.0	81.3	65.6	73.9	1.4741	
Dez/96	1513.6	862.6	2376.2	234.8	179.9	414.6	84.5	79.2	82.6	1.5960	
Abr/97	12828.6	1636.6	14465.1	2651.3	500.1	3151.3	79.3	69.4	78.2	4.4377	
Ago/97	23535.6	1624.4	25160.0	7647.3	545.6	8192.9	67.5	66.4	67.4	4.8414	
Ago/97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-----	-----	-----	0.0000	
Out/97	106.7	180.1	286.8	17.1	46.5	63.6	83.9	74.2	77.8	0.4124	
Jun/98	16997.0	1611.6	18608.6	4992.1	494.6	5486.7	70.6	69.3	70.5	4.3891	
Ago/98	16593.3	1772.7	18366.0	4724.2	554.6	5278.8	71.5	68.7	71.3	4.9215	
Set/98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-----	-----	-----	0.0000	
Nov/98	138.5	131.9	270.4	20.7	31.6	52.4	85.0	76.0	80.6	0.3147	
Nov/98	695.7	723.6	1419.3	100.7	172.1	272.9	85.5	76.2	80.8	1.5273	
Jan/99	8561.0	2352.0	10913.0	1177.1	610.3	1787.4	86.3	74.1	83.6	5.4159	
Mar/99	14778.3	2050.2	16828.5	2966.1	581.7	3547.8	79.9	71.6	78.9	5.1621	
Mai/99	19191.1	2263.6	21454.7	4665.8	689.7	5355.5	75.7	69.5	75.0	6.1205	
Jul/99	16741.7	1154.4	17896.1	5043.4	365.7	5409.1	69.9	68.3	69.8	3.2453	
Ago/99	19364.0	1061.5	20425.5	6390.1	353.2	6743.3	67.0	66.7	67.0	3.1343	
Out/99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-----	-----	-----	0.0000	

Tabela 6. Evolução da Massa Fresca (g), da Massa Seca (g), da Umidade (%) e da Área Foliar (m²) da cultura da cana-de-açúcar ao longo das campanhas e dentro da parcela 5 e M. Os valores em itálico foram estimados. Valores medidos em 1 m² de terreno.

Parcela5		Massa Fresca (g)			Massa Seca (g)			Umidade (%)			Área Foliar (m ²)
campanha	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total		
Out/96	350.3	321.7	672.0	62.2	98.0	160.2	82.2	69.6	76.2	0.8375	
Dez/96	1232.3	730.6	1962.9	190.5	148.1	338.6	84.5	79.7	82.7	1.3146	
Abr/97	8804.3	1177.3	9981.6	1873.3	369.1	2242.4	78.7	68.6	77.5	3.0514	
Ago/97	17595.1	1167.5	18762.6	5405.8	406.8	5812.6	69.3	65.2	69.0	3.1813	
Ago/97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Out/97	70.0	97.2	167.2	11.4	23.1	34.5	83.8	76.2	79.4	0.2051	
Jun/98	14282.6	1044.9	15327.5	4050.2	340.8	4391.0	71.6	67.4	71.4	3.0239	
Ago/98	10176.2	1287.1	11463.3	2680.4	414.3	3094.7	73.7	67.8	73.0	3.6766	
Set/98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Nov/98	98.4	127.3	225.7	14.1	36.6	50.7	85.7	71.2	77.5	0.3170	
Nov/98	242.9	262.2	505.1	35.1	63.5	98.5	85.6	75.8	80.5	0.5633	
Jan/99	3921.0	1538.0	5459.0	470.5	380.4	850.8	88.0	75.3	84.4	3.3753	
Mar/99	5454.9	1220.1	6675.0	858.8	329.5	1188.3	84.3	73.0	82.2	2.9243	
Mai/99	13518.8	2022.8	15541.6	3258.8	621.9	3880.7	75.9	69.3	75.0	5.5188	
Jul/99	7475.0	790.1	8265.1	2198.3	286.0	2484.3	70.6	63.8	69.9	2.5380	
Ago/99	13723.7	706.3	14430.0	4478.3	248.1	4726.4	67.4	64.9	67.2	2.2016	
Out/99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Parcela M		Massa Fresca (g)			Massa Seca (g)			Umidade (%)			Área Foliar (m ²)
campanha	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total	Colmo	Folha	Total		
Out/96	533.7	528.1	1061.8	88.1	154.9	243.1	83.4	70.5	77.1	1.4151	
Dez/96	2742.7	1187.2	3929.9	324.2	296.3	620.5	86.9	76.2	83.7	2.6290	
Abr/97	10877.7	1518.9	12396.6	2420.4	485.6	2906.0	78.0	68.0	76.8	4.3241	
Ago/97	17755.6	1461.8	19217.4	5859.7	505.2	6364.8	66.6	65.4	66.6	4.2132	
Ago/97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Out/97	91.9	133.4	225.3	14.2	32.3	46.5	84.6	75.9	79.4	0.3310	
Jun/98	16960.4	1406.4	18366.8	4991.8	463.5	5455.3	70.6	67.0	70.4	4.1438	
Ago/98	12584.1	1235.2	13819.3	3515.3	418.8	3934.1	72.1	65.6	71.6	3.7008	
Set/98	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	
Nov/98	179.8	234.7	414.5	25.9	59.6	85.5	85.5	74.1	79.1	0.6013	
Nov/98	421.5	453.8	875.3	64.5	112.0	176.5	84.6	75.2	79.7	1.0307	
Jan/99	6301.4	1826.4	8127.8	815.7	491.8	1307.5	87.1	73.0	83.9	4.3723	
Mar/99	10670.9	1592.2	12263.1	2110.9	466.6	2577.4	80.6	70.7	79.2	4.4949	
Mai/99	15095.4	1683.1	16778.5	3776.8	518.4	4295.2	74.9	69.2	74.3	4.7028	
Jul/99	12947.2	1190.9	14138.1	4045.5	428.5	4474.0	68.6	64.0	68.2	3.8436	
Ago/99	13496.0	819.0	14315.0	4410.2	285.3	4695.5	67.4	65.0	67.2	2.4436	
Out/99	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	----	----	----	0.0000	

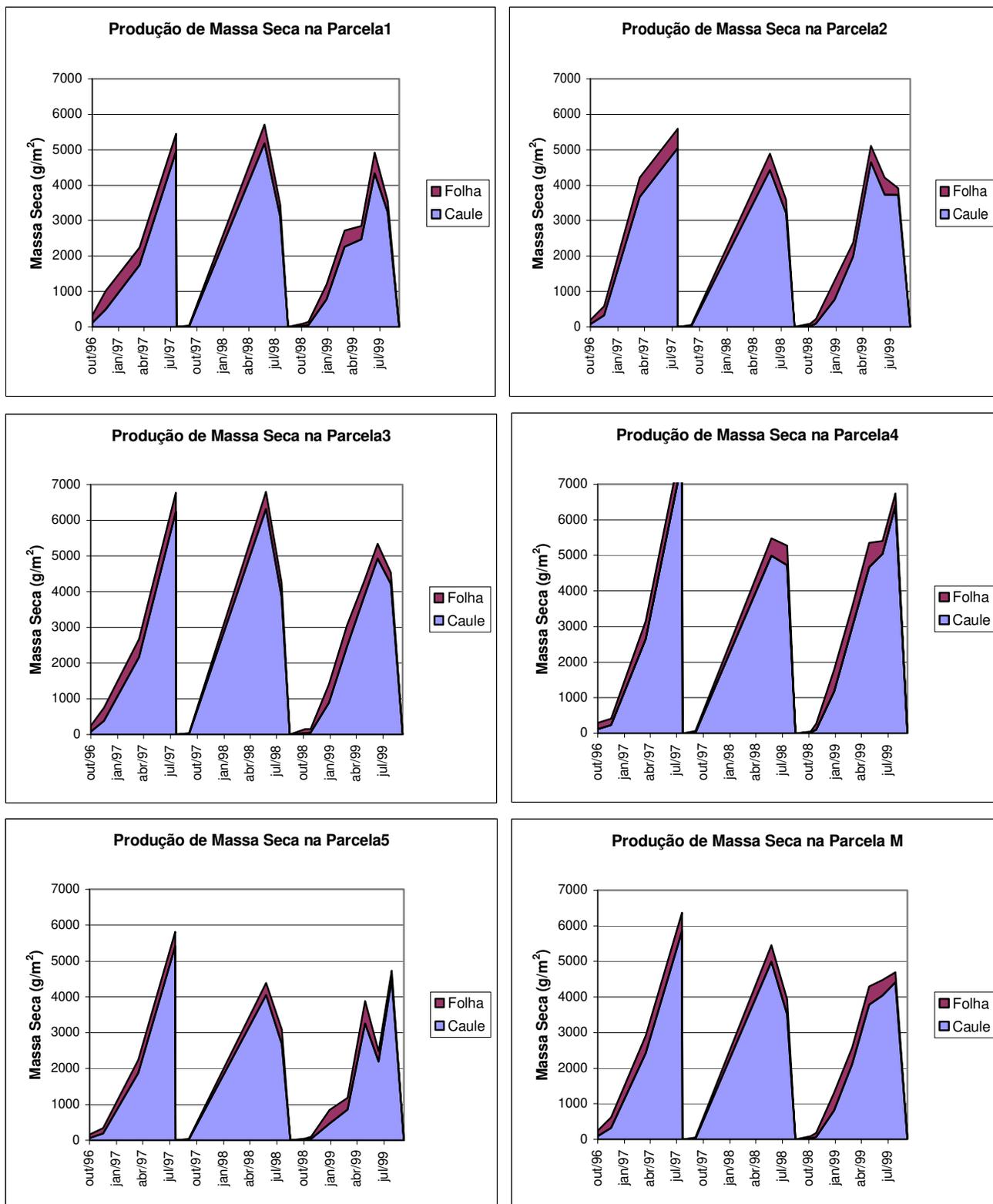


Figura 5. Evolução da Massa Seca (g/m^2 de terreno) nas parcelas 1 a 5 e M (média das parcelas) ao longo das campanhas.

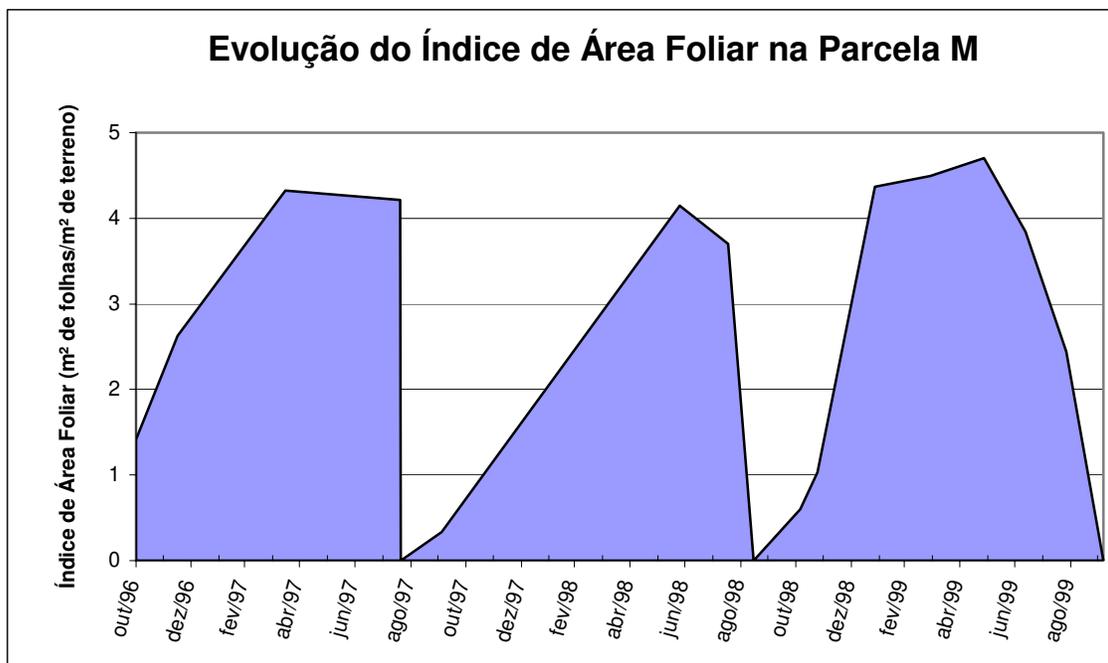


Figura 6. Evolução do Índice de Área Foliar (m^2 de folhas/ m^2 de terreno) da cultura da cana-de-açúcar para a parcela M (média das parcelas) ao longo das campanhas.

Apenas os dados de acúmulo de Massa Seca foram apresentados graficamente, pois esse é o principal parâmetro para expressar o crescimento de uma cultura, visto que a Massa Fresca é influenciada pela Umidade da planta que pode "mascarar" a Produção real de Fitomassa. Como pode-se perceber da Tabela 4 à Tabela 6, é clara a tendência apresentada pela Umidade da planta ao longo do ciclo vegetativo, para a qual se observa uma diminuição à medida que se avança para os meses mais secos do ano, no final do ciclo. Segundo BRUNINI (1997), esse período seco no final do ciclo é importante para favorecer o acúmulo de sacarose nos colmos e para diminuir o risco de florescimento.

A partir da Figura 5 pode-se perceber que, embora as curvas não estejam suavizadas, os dados apresentam distribuição sigmóide e os modelos de ajustes escolhidos no item seguinte confirmam esse comportamento. O comportamento das parcelas individuais apresenta, de maneira geral, pouca variação e a sua média está representada na parcela M. Como já citado no item 2.4, algumas medidas parecem inconsistentes, como é o caso do final do primeiro ciclo estudado nas parcelas 4 e 5, onde os valores de Massa Seca dos

Colmos se encontram muito altos, influenciando a média final desse ciclo que aparentemente deveria ser menor.

Os dados fornecidos pela Usina São Martinho para a estimativa da Massa Fresca Colhida foram de 104,77ton/ha, 110,21ton/ha e 82,70ton/ha, respectivamente para os ciclos 1, 2 e 3. Esses valores não podem ser comparados diretamente aos dados de Massa Fresca ou Seca dos Colmos pois as técnicas de amostragem são muito diferentes e uma simples conversão dos dados de g/m^2 para ton/ha poderia levar a valores fora da realidade. Porém, pode-se perceber por meio deles, que o primeiro ciclo de fato apresentou uma produtividade menor que o segundo, o que seria percebido também aqui não fossem os valores altos observados nas parcelas 4 e 5. Apenas como ilustração da menor Produção Final que teria sido obtida, no item sobre ajuste de curvas, a seguir, modelos foram testados para o primeiro ciclo desprezando o último valor de Massa Seca dos Colmos e de Massa Seca Total na parcela M.

O terceiro ciclo estudado apresentou uma queda em relação à Produção Máxima do segundo em torno de 20% para Massa Fresca de Colmos, o que está próximo dos valores obtidos pela Usina São Martinho, que apresentam uma queda de 25% também para Massa Fresca de Colmos pesadas em caminhão. Considerando-se as diferenças nos métodos de medida, esses valores estão coerentes. Para Massa Seca de Colmos essa queda foi menor, ficando em torno de 11%, o que se pode explicar pela menor Umidade apresentada pelas amostras no final do terceiro ciclo, como se observa na Tabela 6.

2.5.2. Ajuste de Curvas

Como já citado, para determinar as curvas que melhor se ajustaram ao desenvolvimento da cultura em cada ciclo, utilizou-se o programa AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986). A escolha das curvas baseou-se não só no Coeficiente de Determinação da regressão, mas também na possibilidade de se encontrar uma interpretação biológica para o seu comportamento. Portanto, nem sempre as curvas de maior R^2 foram selecionadas, principalmente os polinômios de alto grau que apresentavam ajustes praticamente perfeitos aos dados, porém sem apresentarem um sentido biológico para as suas variações. Assim, as

curvas escolhidas para cada um dos ciclos estão apresentadas na Tabela 7 e da Figura 7 à Figura 10.

De maneira geral o modelo que melhor se ajustou à Massa Seca dos Colmos e Total foi o Gompertz, modelo sigmoidal que permite representar bem a fase assintótica característica do final dos ciclos. Como o segundo ciclo não podia ser usado para modelagem, pois possuía apenas três pontos e o último apresentou uma queda acentuada na Massa Seca dos Colmos e, conseqüentemente, na Total, optou-se por incluir a origem (0,0) e um quarto ponto representando um valor no meio do ciclo. Esse artifício foi usado apenas para se estimar uma curva hipotética que pudesse representar o ciclo por meio do modelo Gompertz, passando pelos dois pontos medidos e que tivesse um comportamento semelhante aos outros dois ciclos.

Tabela 7. Curvas de crescimento para Massa Seca dos Colmos (MSC em g/m² de terreno), Massa Seca Total (MST em g/m² de terreno), Massa Seca de Folhas (MSF em g/m² de terreno) e Índice Área Foliar (IAF em m² de folhas/m² de terreno). D representa o número de Dias Após o Corte.

Ciclo	Modelos Ajustados para a Massa Seca dos Colmos (g/m ² de terreno)	R ²
1	MSC = 6000 * EXP(-17,0055 * EXP(-1,713641E-2 * D))	0,9467
2	MSC = 5500 * EXP(-14,41961 * EXP(-1,601755E-2 * D)) **	0,9960**
3	MSC = 4500 * EXP(-16,35827 * EXP(-1,78254E-2 * D))	0,9208
Ciclo	Modelos Ajustados para a Massa Seca Total (g/m ² de terreno)	R ²
1	MST = 6400 * EXP(-17,52474 * EXP(-2,033633E-2 * D))	0,9082
2	MST = 5500 * EXP(-11,83468 * EXP(-1,244793E-2 * D)) **	0,9545**
3	MST = 4700 * EXP(-22,03484 * EXP(-2,365245E-2 * D))	0,9063
Ciclo	Modelos Ajustados para a Massa Seca de Folhas (g/m ² de terreno)	R ²
1	MSF = -6,599835 + 3,094892 * D - 2,741978E-3 * D ² - 5,467095E-6 * D ³	0,9982
2	MSF = -2,979851E-2 + 0,1722078 * D + 1,348955E-2 * D ² - 2,974877E-5 * D ³	0,9999
3	MSF = -21,08408 + 2.228236 * D + 0,0103368 * D ² - 4,156766E-5 * D ³	0,9314
Ciclo	Modelos Ajustados para o Índice de Área Foliar (m ² de folhas /m ² de terreno)	R ²
1	IAF = -4,126521E-2 + 2.711605E-2 * D - 1,817482E-5 * D ² - 6,975176E-8 * D ³	0,9988
2	IAF = -2,91571E-4 + 2,687424E-3 * D + 1,156081E-4 * D ² - 2,61847E-7 * D ³	0,9999
3	IAF = -0,182991 + 1,962687E-2 * D + 1,051489E-4 * D ² - 4,092729E-7 * D ³	0,9448

**Esses modelos são apenas uma suposição, pois não havia dados suficientes para estimá-los(vide texto).

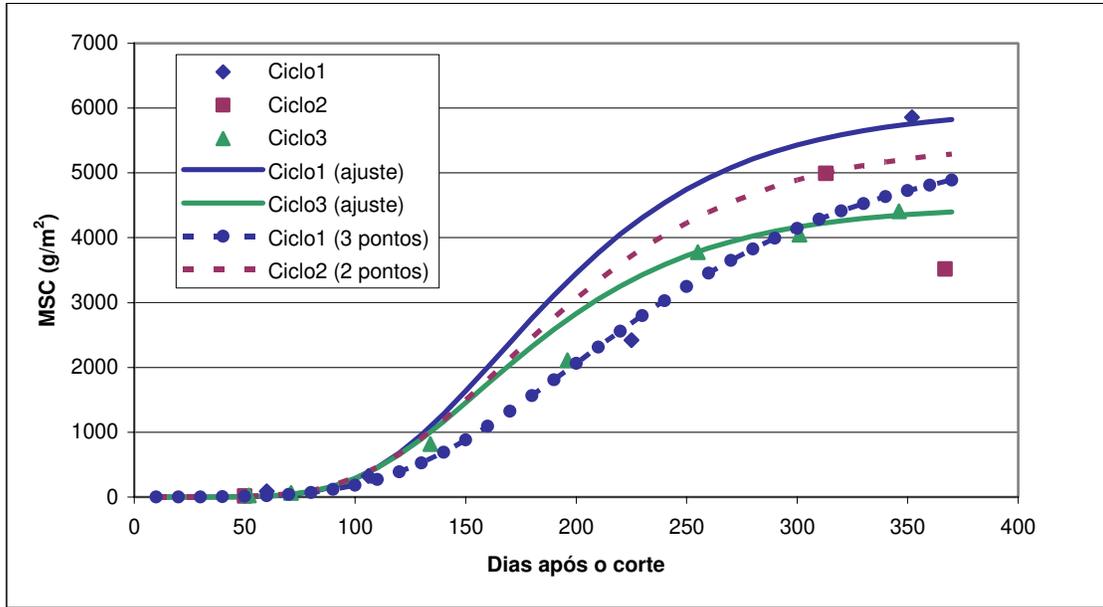


Figura 7. Modelos ajustados para Massa Seca dos Colmos (MSC em g/m^2 de terreno) para os três ciclos individualmente. As curvas tracejadas representam modelos hipotéticos, pois foram baseados num número insuficiente de pontos amostrados. Também são apresentados os valores observados.

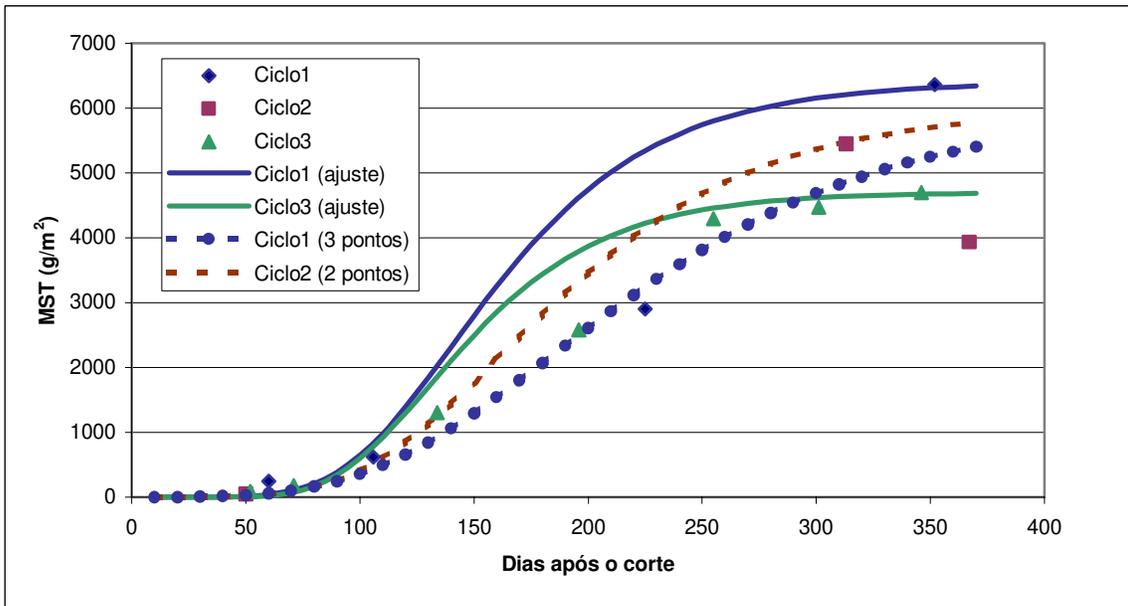


Figura 8. Modelos ajustados para Massa Seca Total (MST em g/m^2 de terreno) para os três ciclos individualmente. As curvas tracejadas representam modelos hipotéticos, pois foram baseados num número insuficiente de pontos amostrados. Também são apresentados os valores observados.

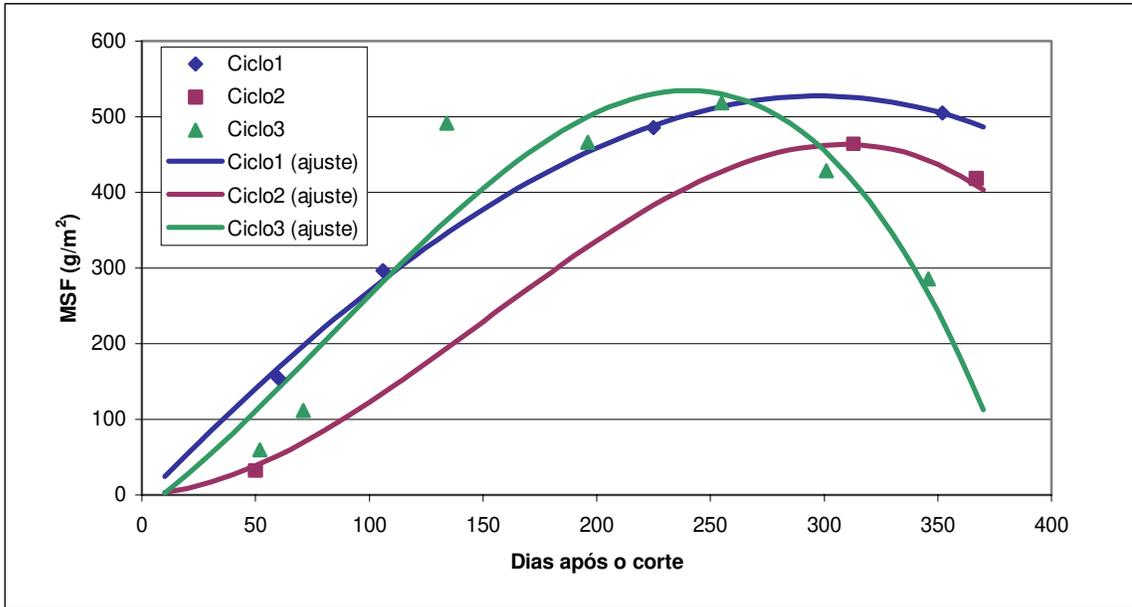


Figura 9. Modelos ajustados para Massa Seca de Folhas (MSF em g/m^2 de terreno) para os três ciclos individualmente. Também são apresentados os valores observados.

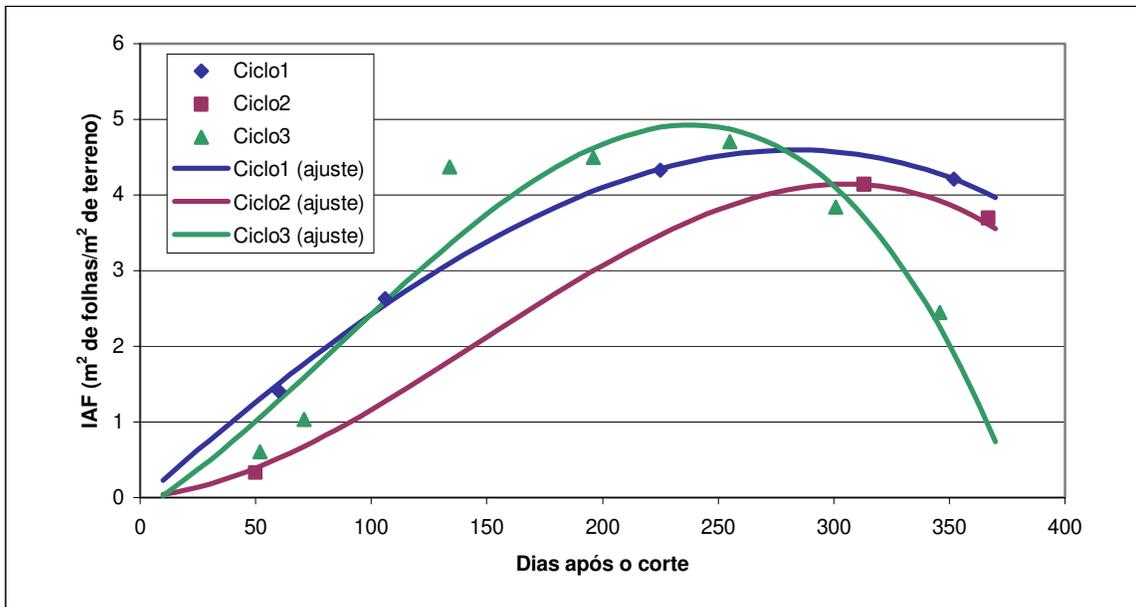


Figura 10. Modelos ajustados para o Índice de Área Foliar (IAF em m^2 de folhas/ m^2 de terreno) para os três ciclos individualmente. Também são apresentados os valores observados.

Como já justificado no item 2.4, esse comportamento diferenciado do segundo ciclo, apresentando uma queda na média da Massa Seca dos Colmos e Total observadas para a última campanha, foi provocado pelo florescimento da cana-de-açúcar, o que é indesejável para a indústria sucroalcooleira justamente por diminuir a quantidade de açúcar nos colmos. Embora tenha impossibilitado a modelagem do ciclo que já possuía poucos pontos amostrados, foi interessante por detectar uma alteração fenológica da cultura, que foi o início da fase reprodutiva, tendo, portanto, um significado biológico.

Assim, os modelos representados na Tabela 7 para a Massa Seca dos Colmos e Total do segundo ciclo são apenas uma sugestão plausível de ajuste e seus Coeficientes de Determinação R^2 têm pouco significado, pois foram introduzidos pontos não amostrados. Por essa razão, foram representados por uma linha tracejada na Figura 7 e na Figura 8. Ainda nessas figuras, foram representados por linhas pontilhadas os modelos de melhores ajustes caso se desconsiderasse o último ponto do primeiro ciclo, que aparentemente possui inconsistência. Como se observa nessas Figuras, os modelos obtidos se enquadrariam melhor aos resultados de Produção Final apresentados pela Usina São Martinho, sendo intermediários aos dos ciclos 2 e 3.

Pelos dados das tabelas acima, observa-se que o terceiro ciclo estudado é mais representativo pelo maior número de campanhas realizadas. Com base nele pôde-se calcular taxas de crescimento que mostraram o bom enquadramento dos modelos sigmoidais ao crescimento da cultura, que pode ser dividido em três fases: estabelecimento, crescimento vegetativo e maturação. Assim, de setembro a novembro - campanhas 8 e 9 - a cultura estava em fase de rebrota e restabelecimento com taxa de crescimento da Massa Seca Total de 2 a 5 g/m²/dia. De novembro a maio - campanhas 10 a 12 - apresentou um crescimento vegetativo mais rápido até aproximadamente os 200 dias após o início do ciclo, com taxa variando de 18 g/m²/dia ao máximo de 29 g/m²/dia. A partir de maio - campanhas 13 e 14 - entrou em fase de estabilização do crescimento e da maturação, com taxa de 4 a 5 g/m²/dia. A taxa de crescimento média de todo o ciclo foi de 15 g/m²/dia. MACHADO (1981) apresenta, para cana de ciclo de 18 meses, o valor de 25 g/m²/dia em torno do 300º dia e taxa média de 12 g/m²/dia. Como já citado, segundo dados da própria Usina São Martinho apresentados acima, esse terceiro ciclo foi o de menor Produção, sendo de 20 a 25% menor que os outros

dois anteriores, porém as taxas de crescimento destes não devem divergir muito das apresentadas.

Para Área Foliar o modelo Cúbico é o que melhor se ajusta, visto que no final do ciclo há uma queda normal na Massa Seca de Folhas fotossinteticamente ativas, pois a planta passa a concentrar sua energia na acumulação de assimilados no colmo e início da fase reprodutiva.

Tentando determinar um comportamento padrão para a cultura, independentemente das diferenças entre as condições meteorológicas dos três ciclos, fez-se uma normalização dos dados de Massa Seca dos Colmos - parâmetro de principal interesse na indústria sucroalcooleira e ao qual se deu maior destaque neste trabalho - dos três diferentes ciclos. Essa normalização transformou os dados em proporção da Massa Seca dos Colmos Máxima do ciclo, bastando portanto, dividir cada valor medido em um determinado ciclo pela Massa Seca dos Colmos Máxima produzida naquele ciclo. Para isso utilizaram-se os dados da parcela M, apresentados na Tabela 6. Dessa normalização resultaram os dados apresentados na Figura 11 juntamente com o modelo de ajuste, que não inclui o valor de Massa Seca dos Colmos medido no florescimento (17/08/98) e que pode ser representado pela equação:

$$MSC_{prop} = 1,309664 * 10^{-16} * D^{(11,33342 - 1,995582 * \log(D))}, R^2 = 0,9866 \quad (4)$$

onde, MSC_{prop} é a Massa Seca dos Colmos(MSC) Proporcional à MSC Máxima do ciclo,
dada por: MSC medida/MSC Máxima do ciclo; e

D é o número de Dias Após o Corte.

Com base nesse modelo, que possui um bom ajuste, pode-se perceber a coerência entre o crescimento nos diferentes ciclos. Embora a última campanha do segundo ciclo não tenha sido usada por provocar um grande desvio da curva ajustada, isso também apresenta coerência, pois o florescimento é indesejável justamente por reduzir o teor de açúcares no colmo e, conseqüentemente, sua Massa Seca.

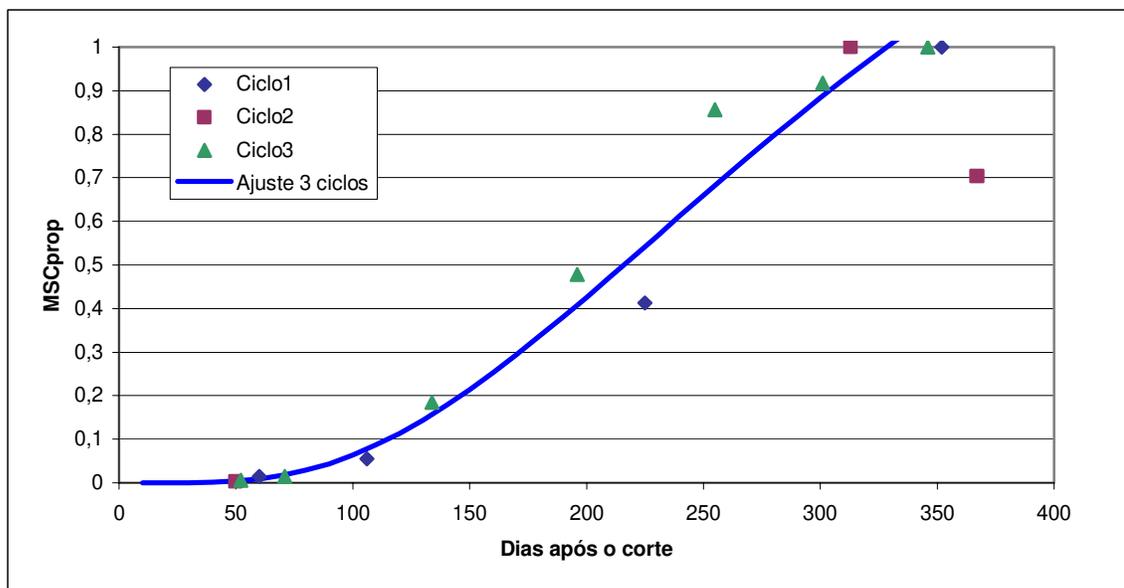


Figura 11. Modelo ajustado para Massa Seca dos Colmos proporcional à Produção máxima do ciclo (MSCprop adimensional) para os três ciclos conjuntamente.

Esse modelo ressalta o comportamento normal da variedade ao longo do ciclo de crescimento, procurando minimizar a expressão da condição meteorológica, que seria a principal responsável pelas diferenças na Produção Final entre os ciclos. Além disso, esse modelo foi buscado com o intuito de se poder realizar uma previsão da Produção Final do ciclo, baseado numa medida da Produção de Massa Seca dos Colmos após um determinado número de Dias (D) contados a partir do corte do ciclo anterior.

2.5.3. Estimativa da Massa Seca a partir do Índice de Área Foliar

Como citado no item anterior, para utilização do modelo apresentado na Figura 11 é necessária a entrada de um valor que expresse a Produção obtida em determinado dia (D) após o início do ciclo. Esse valor pode ser obtido de forma destrutiva por meio de coleta de material no campo e posterior análise no laboratório, por exemplo, como realizado nas campanhas deste trabalho. Porém, o objetivo neste item foi obter um modelo que evitasse a amostragem destrutiva, o que poderia ser conseguido se houvesse bom ajuste entre o Índice de Área Foliar e a Produção de Massa Seca de Colmos, pois o Índice de Área Foliar pode

ser obtido de maneira não destrutiva a partir de uma amostragem de campo com o aparelho LI-COR/LAI-2000, como já apresentado no item 2.4.2.2.

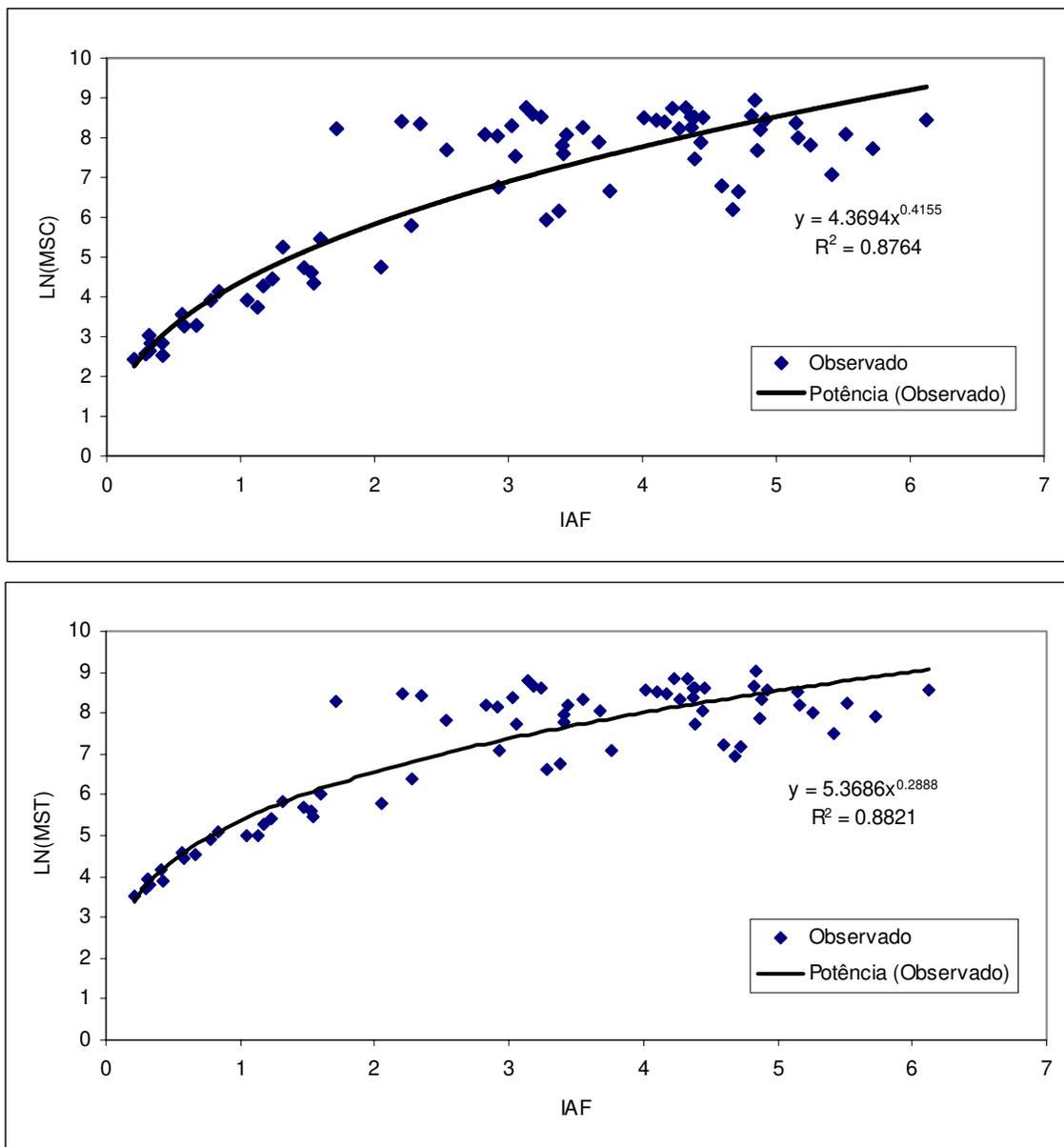


Figura 12. Modelos ajustados para Índice de Área Foliar (IAF) e o logaritmo natural da Massa Seca de Colmos (LN(MSC) - acima) ou o logaritmo natural da Massa Seca Total (LN(MST) - abaixo). São apresentados os valores observados e a curva do modelo Alométrico Linear ou "Potência" (Observado), obtida a partir deles.

Além disso, dentre as técnicas de sensoriamento remoto, as relações entre o Índice de Área Foliar e o Índice de Vegetação são as que apresentam melhores resultados no acompanhamento orbital do desenvolvimento de vegetal. Como o objetivo principal deste trabalho de tese foi estimar a Produção da cultura da cana-de-açúcar utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto, esse tipo de modelo faria a ligação entre o Índice de Área Foliar Orbital e a Massa Seca dos Colmos e Total, ou Fitomassa.

Essa hipótese foi testada e foi possível obter uma boa correlação entre esses dois parâmetros, porém, o modelo de melhor ajuste exigiu que os dados de Massa Seca fossem transformados, utilizando-se seu logaritmo natural. A seguir são apresentadas as melhores curvas, representadas também na Figura 12:

$$\text{Ln}(MSC) = 4,369411 * (\text{IAF}^{0,4154782}), (R^2 = 0,8764) \quad (5)$$

$$\text{Ln}(MST) = 5,368641 * (\text{IAF}^{0,2887673}), (R^2 = 0,8821) \quad (6)$$

onde, Ln (MSC) é o logaritmo natural ou neperiano da Massa Seca de Colmos

Ln (MST) é o logaritmo natural ou neperiano da Massa Seca Total

IAF é o Índice de Área Foliar na fase de crescimento.

Segundo MAGALHÃES (1985), pode haver uma relação mais complexa que uma simples regressão linear correlacionando os parâmetros de crescimento da área foliar e da Fitomassa, como foi observado aqui. O autor apresenta como relação geral a fórmula:

$$P = a + b * A^\alpha \quad (7)$$

onde, a , b e α são os coeficientes de ajuste do modelo e com significado biológico;

A é a área ocupada pelas folhas da cultura; e

P é o peso seco da cultura.

MAGALHÃES (1985) também afirma que, desde que o coeficiente a seja considerado desprezível, o que normalmente representa a realidade, α indica a relação entre a taxa de crescimento relativo da Fitomassa e a da Área Foliar e este é o quociente que descreve a relação alométrica entre A e P .

De fato, para os modelos obtidos, o valor de a foi nulo e α deve representar a relação descrita pelo autor, tendo, portanto, sentido biológico. Ainda em relação à Equação 7, é importante deixar claro que MAGALHÃES (1985) considera A como a área ocupada pelas folhas e não o Índice de Área Foliar, embora eles estejam intimamente relacionados. Considera ainda P como a Fitomassa produzida e não a transformação por meio do logaritmo natural como usado aqui. Apesar disso, o melhor ajuste, dentre vários outros, foi o do modelo alométrico linear (Figura 12), como descreve o autor.

Uma consideração importante sobre esse modelo é que, com base numa simples análise visual da Figura 12, pode-se perceber que acima do Índice de Área Foliar de 3 (m^2 de folhas/ m^2 de terreno) as curvas iniciam a estabilização e a distribuição dos pontos em seu entorno é quase aleatória, o que faz com que tenham pouca sensibilidade na estimativa da Produção de Massa Seca. Portanto, é de se esperar que valores de Índice de Área Foliar abaixo de 3 estimem valores mais próximos do real, pois as curvas apresentam melhor correlação com os pontos amostrados nessa faixa. Essa faixa também é mais conveniente para a estimativa dos Índices de Vegetação apresentada nos Capítulos 3 e 4, principalmente o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) que é o mais amplamente utilizado mas que apresenta rápida saturação com o aumento dos valores de Índice de Área Foliar. Apesar dessas considerações, esses modelos foram testados nos Capítulos 3 e 4 utilizando-se os valores de Índices de Vegetação de Campo e Orbitais, respectivamente.

2.6. Conclusões sobre a Análise de Crescimento da Cana-de-Açúcar

As curvas de forma sigmoideal são as que mais se ajustam ao padrão de crescimento da cana-de-açúcar, permitindo uma interpretação com sentido biológico. Dentre elas, as que representaram melhor o comportamento dos dados obtidos em campo foram:

- Gompertz para a Massa Seca Total e dos Colmos; e
- Cúbica para a Massa Seca das Folhas e para o Índice de Área Foliar.

O modelo Gompertz se enquadrou melhor à Massa Seca Total e à Massa Seca dos Colmos porque permite descrever três fases bem distintas da cultura. A primeira é a fase de estabelecimento, logo após a germinação, onde o crescimento é lento e predominantemente foliar. Na segunda fase a cana-de-açúcar apresenta desenvolvimento rápido e acúmulo de Massa Seca tanto Foliar quanto de Colmos. Na terceira e última fase o crescimento vegetativo se estabiliza, ficando a curva assintótica, e a cultura se prepara para entrar na fase reprodutiva, que é evitada pela indústria, pois provoca perda no teor de açúcar dos colmos.

O modelo cúbico se adapta melhor aos parâmetros que envolvem folhas (Massa Seca das Folhas e Índice de Área Foliar), pois, embora ao longo do ciclo as fases sejam basicamente as mesmas descritas para os Colmos, no final do ciclo esse modelo pode representar melhor a diminuição da quantidade de folhas, como preparação para o período reprodutivo.

A íntima relação entre a Massa Seca e a Área Foliar permitiu que o Índice de Área Foliar fosse melhor estimado através de regressão linear simples entre esses dois parâmetros. Porém, mesmo apesar do uso em condições desfavoráveis, os dados do aparelho LI-COR/LAI-2000 permitiram um bom ajuste com o Índice de Área Foliar, podendo ser usado caso não se disponha de medidas da Massa Seca Foliar.

O modelo alométrico linear foi o que apresentou melhores Coeficientes de Determinação e permite obter melhores estimativas da Produção de Massa Seca Total e de Colmos, se tomados apenas valores de Índice de Área Foliar abaixo de 3 (m^2 de folhas/ m^2 de terreno). Esse modelo tornou viável obter dados de Massa Seca a partir de medidas não destrutivas do Índice de Área Foliar, como as do aparelho LI-COR/LAI-2000 citado acima ou via satélite, o que reforçou a hipótese da viabilidade de se determinar a Fitomassa através de imagens orbitais.

A análise dos dados de Massa Seca Proporcional à Massa Seca Máxima do ciclo mostrou um comportamento padrão para os três ciclos, apesar das diferenças entre as condições reinantes em cada um dos ciclos. O modelo obtido com R^2 de 0,98 permite afirmar que é

possível correlacionar a Massa Seca Proporcional aos Dias a partir do início do ciclo, ou seja, Dias Após o Corte do ciclo anterior.

Com base nesses modelos, a previsão da Produção Final de um determinado ciclo pode ser obtida através dos seguintes passos:

- Estimativa do Índice de Área Foliar e entrada do valor obtido no modelo de cálculo da Massa Seca dos Colmos "instantânea" ou atual (esta também poderia ser obtida através de análise destrutiva);
- Entrada do valor de Massa Seca dos Colmos e do número de Dias após o corte, ou início do ciclo, no modelo de Massa Seca Proporcional para a obtenção da Massa Seca dos Colmos Máxima ou Final, ou seja, a Produção Final da cultura.

Um ponto importante a se considerar é que seria desejável que se determinasse qual é o melhor período para se fazer essa estimativa da Produção atual visando estimar a Produção Final. Isso equivaleria a determinar um ponto no qual os fatores meteorológicos adversos já não teriam mais influência sobre o desempenho da cultura, ou que pelo menos apresentassem baixa probabilidade de ocorrência. Essa análise porém, exigiria uma amostragem mais ampla, usando vários anos a mais de dados, para que se pudesse abranger uma gama maior de fenômenos meteorológicos que influenciassem de maneiras distintas a Produção Final. De qualquer forma, esse valor deveria se situar após a metade da duração do ciclo, pois quanto mais tarde, menor a chance de erro. Porém, quanto antes essa estimativa for obtida, melhor o planejamento nas operações agrícolas, fabris e de mercado, aumentando a vantagem competitiva. Outro fator que justificaria essa estimativa precoce é a melhor estimativa da Massa Seca, ou Fitomassa, para valores de Índice de Área Foliar mais baixos, caso não se pudesse realizar amostragens destrutivas. Portanto, o ponto ótimo para essa estimativa deve se situar próximo à metade do ciclo.

3. Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais de Campo

Com base nas análises do Capítulo 2, que permitiram concluir que é possível estimar a Fitomassa da cana-de-açúcar a partir de seu Índice de Área Foliar, e na hipótese de que é possível estimá-lo a partir de dados espectrais, procurou-se monitorar as condições espectrais de campo para se estabelecer modelos que correlacionem Índices Espectrais de Vegetação com o Índice de Área Foliar da cultura, ao longo de seu crescimento. Foram então estimados Índices de Vegetação para cada campanha, avaliada sua correlação com o Índice de Área Foliar e diretamente com a Produção de Massa Seca dos Colmos.

3.1. Introdução

As análises de crescimento e do acúmulo de Massa Seca dos Colmos Proporcional, realizadas no Capítulo 2, permitiram concluir que é possível estimar a Produção de Massa Seca dos Colmos no final do ciclo. Isso poderia ser feito dispondo-se de um valor para esse parâmetro em um ponto qualquer ao longo do ciclo e do número de dias D após o seu início correspondente a esse ponto que, de preferência, deve ser tomado próximo à metade do ciclo. Além disso, concluiu-se que, caso não se disponha de um valor de Massa Seca dos Colmos, por não se poder realizar uma análise destrutiva, é possível estimá-la para esse dia D a partir de dados do Índice de Área Foliar, que podem ser obtidos de forma não destrutiva utilizando o aparelho LI-COR/LAI-2000 ou por meio de imagens de satélite, estimando Índices de Vegetação que normalmente são bem correlacionados ao Índice de Área Foliar.

De maneira geral, esses Índices de Vegetação são combinações de duas bandas do espectro eletromagnético, o Vermelho e o Infravermelho Próximo, nas quais a vegetação apresenta características bem distintas. Eles têm sido estudados desde o final da década de sessenta e vêm recebendo melhorias ao longo dos anos. Alguns autores (BARET & GUYOT, 1991; EASTMAN, 1999; MOREIRA, 2000) apresentam um breve histórico da evolução

desses índices e de sua aplicação. Alguns exemplos de aplicação são estimativa da quantidade de energia fotossinteticamente ativa e atividade fotossintética (BARET & GUYOT, 1991; WIEGAND et al., 1991; ASRAR et al., 1992), do índice de área foliar (ASRAR et al., 1984; CLEVERS, 1989; GUTMAN, 1991; GOWARD et al., 1991; CASANOVA et al., 1997), da biomassa, ou fitomassa, e da Produção de culturas (BERNET & THOMPSON, 1982; ASRAR et al., 1985; CASANOVA et al., 1997; UNGANAI & KOGAN, 1998).

Baseado no descrito acima, o objetivo deste Capítulo 3 foi estimar a Massa Seca dos Colmos a partir de dados espectrais de campo, como forma de atestar a viabilidade de fazê-lo por meio do satélite NOAA14/AVHRR. Para isso foram monitoradas as alterações na Refletância de Campo provocadas, principalmente, pelas alterações do Índice de Área Foliar da cultura da cana-de-açúcar. Os valores de Refletância no Vermelho e no Infravermelho Próximo foram transformados em Índices de Vegetação para minimizar a variabilidade devida a fatores externos (BARET & GUYOT, 1991), permitindo uma melhor correlação dos dados espectrais com o Índice de Área Foliar e a Produção de Massa Seca da cana-de-açúcar.

A partir desse monitoramento de campo buscou-se ajustar equações que permitissem estimar a Massa Seca dos Colmos e, aplicando a equação obtida no capítulo anterior para Massa Seca dos Colmos Proporcional, estimar a Produção Final. Estimaram-se também regressões diretas entre esses índices e a Massa Seca dos Colmos. Além disso, procurou-se obter dados que servissem de referência terrestre para os dados orbitais apresentados no capítulo 4, os quais, após as correções geométricas e atmosféricas necessárias, devem apresentar comportamento parecido ao dos dados de campo quanto às correlações com o Índice de Área Foliar e com a Produção de Massa Seca de Colmos.

3.2. Método de Estimativa da Refletância

Para minimizar a variabilidade devida a fatores externos e ao aparelho utilizado e para permitir a comparação de dados gerados por sensores diferentes, é recomendado que se utilizem dados de Refletância ao invés de dados brutos de contagens de pulsos eletrônicos, como os do aparelho usado em terra, ou dos níveis de cinza das imagens do satélite (BARET & GUYOT, 1991; GUTMAN, 1991; GOWARD et al., 1991; MORAN et al., 1991). Portanto, a

determinação da Refletância da superfície foi o primeiro passo para a estimativa dos Índices Espectrais de Vegetação para que estes pudessem ser correlacionados ao Índice de Área Foliar e também à Massa Seca dos Colmos, visando estimar a Produção Final da cana de açúcar.

Das campanhas apresentadas na Tabela 2 do item 2.3, o estudo da Refletância de campo baseou-se apenas nas realizadas a partir do dia 23/06/97, campanha 6, no final do segundo ciclo estudado na cultura. As medidas das cinco campanhas anteriores a esta foram realizadas com o espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800. Após uma análise mais detalhada de seus resultados, percebeu-se grande incoerência nos dados gerados, o que levou à descoberta de que o cabo de fibra ótica, utilizado apenas nas medidas da Energia Refletida pela cultura, estava partido.

Portanto, esses dados foram descartados e somente após a chegada do radiômetro CIMEL-313/22 foi possível realizar medidas confiáveis de Refletância da cultura para que elas pudessem ser comparadas com os dados de crescimento e os orbitais estudados. Como esse novo aparelho possui bandas largas e não se dispunha dos dados do espectrorradiômetro, no qual pode-se definir bandas de até 1 nm, não foi possível apresentar o espectro de Refletância detalhado da cultura. Assim, nos itens a seguir foram utilizadas apenas as medidas de Energia Refletida, feitas com o novo radiômetro.

Conforme descrito por vários autores (DUGGIN & CUNIA, 1983; ZULLO Jr., 1994), para se estimar a Refletância de uma superfície é necessário medir a Radiação Incidente e a Radiação Refletida por ela, simultaneamente ou com intervalos pequenos o suficiente para impedir que haja diferença nas condições da atmosfera entre as duas medidas. Essas medidas podem ser obtidas utilizando-se dois aparelhos, que podem ser ou não do mesmo modelo e geometria de visada. Porém, em qualquer um dos casos eles precisam ser intercalibrados. Enquanto um deles mede a Radiação Incidente, outro mede a Refletida pela superfície. A equação a seguir expressa matematicamente a relação.

$$R = \frac{ER_s}{EI} * FI \quad (8)$$

onde, R é o fator de Refletância da superfície;
ER_s é a Energia Refletida pela superfície;
EI é a Energia Incidente sobre a superfície; e
FI é o Fator de Intercalibração entre os aparelhos.

Esse Fator de Intercalibração (FI) entre os aparelhos só é utilizado caso as duas medidas sejam tomadas por aparelhos diferentes pois, como apresentado no item 3.2.2, outra forma de realizá-las é utilizando um só aparelho, que após a primeira medida é imediatamente mudado de posição para medir a Radiação Incidente. É importante ressaltar que não pode ocorrer variação na atmosfera como, por exemplo, nuvens impedindo a Radiação Direta em uma das medidas e não em outra. De preferência, deve-se fazer medidas com céu limpo, para evitar essas variações entre as duas medidas e entre os conjuntos de duas medidas. De maneira geral, a condição de céu limpo foi conseguida neste trabalho, pois essa também era exigida para a obtenção de imagens de satélite utilizadas no Capítulo 4 e, mesmo quando isso não era possível, tomou-se o cuidado para não realizar medidas de Radiação Incidente e Refletida sob condições diferentes.

ZULLO Jr. (1994) cita os trabalhos de GU et al. (1990) e GU (1991) que apresentam fatores que podem alterar a precisão das medidas experimentais da Refletância, tais como: características do radiômetro quanto à linearidade de sua resposta em função do comprimento de onda, fundo de escala e variação térmica; método empregado para as medidas da Energia Solar Incidente; variação espectral, angular, espacial e temporal da Refletância da superfície; calibração absoluta do radiômetro; propriedades não-lambertinas da superfície; e a quantidade de medidas feitas que, para uma precisão de 2,5%, é da ordem de uma centena.

A maioria desses fatores foi levada em consideração nas medidas realizadas, porém o número médio de pontos de Refletância utilizado para cada campanha, descartados previamente os valores que apresentaram inconsistência, ficou em torno de 40 medidas que foram utilizadas para compor a Refletância média. Dessas 40 medidas, cerca de 15 foram

tomadas próximas à passagem do satélite na parcela 3 que, como já descrito no item 2.4, foi adotada como representante da média das condições reinantes no campo, o que foi confirmado pelos valores de correlação com a parcela M. As demais, aproximadamente 25 medidas, foram realizadas ao longo do dia enquanto se caminhava pelas parcelas, buscando-se assim coletar amostras para verificar a sua variação com o ângulo de incidência Solar. A variação temporal como resultado das alterações na cultura é justamente o objetivo deste capítulo, como já descrito anteriormente.

Nessas estimativas da Refletância, as medidas de Radiação Refletida foram tomadas nas cinco parcelas apresentadas na Figura 2, com no mínimo cinco repetições em cada uma delas e foram analisadas quanto à sua consistência para o cálculo posterior da Refletância. Nessa análise de consistência foram descartados valores que apresentassem variação espectral ao longo dos filtros muito distinto do comportamento médio, ou os que resultaram em valores de Refletância acima de 100%. Dessa forma foi avaliada a variação espectral citada por GU et al. (1990).

A medida individual da Radiação Refletida era rápida e todas as repetições de uma mesma parcela puderam ser tomadas num intervalo máximo de dez minutos. O critério adotado para essas medidas na parcela foi o de amostrar a maior variação interna possível para compor uma média próxima da radiação que o satélite recebe, um misto entre radiância do solo, da palhada e da cultura. Esse método também foi usado por HUETE et al. (1985) no trabalho que deu a base para a definição do Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI - Soil Adjusted Vegetation Index - HUETE, 1988), bastante difundido atualmente. Assim, procurou-se amostrar a maior variabilidade possível dentro da parcela e entre as cinco parcelas que, como citado no item 2.3, foram escolhidas para representar a variabilidade intrínseca à área de estudo, de forma a compor uma média mais próxima possível da Refletância medida a partir do Satélite. Foram tomadas medidas tanto sobre a planta verde, quanto sobre o solo com palhas ou sobre as folhas secas ou palhada, dependendo se no início ou mais próximo ao final do ciclo, respectivamente, o que justifica os altos Coeficientes de Variação obtidos. Portanto, também foi levado em consideração o fator variabilidade espacial citado por GU et al. (1990).

A medida da Radiação Incidente era mais demorada e a capacidade de armazenagem do aparelho LI-COR/LI-1800 não permitia um grande número de medidas acumuladas em seu banco de memória. Por esse motivo, esse parâmetro foi tomado uma única vez para cada parcela e foi feita com o espectrorradiômetro pré-programado, como descrito no item 3.2.2. Portanto, todas as medidas de Radiação Refletida de uma parcela foram comparadas a uma medida da Radiação Incidente correspondente.

Essas medidas foram usadas para comparação com as Refletâncias Orbitais obtidas a partir das imagens de satélite. Estas imagens contêm a representação da Energia Refletida por cada *pixel* da imagem de 1,1 x 1,1 km, em toda a área deste de uma só vez, como descrito no Capítulo 4. Por isso, para que houvesse coerência na comparação, os valores médios das cinco parcelas foram usados para compor uma única média geral para a Refletância da cultura em cada campanha.

3.2.1. Radiação Refletida pela Cultura

Essas medidas foram tomadas pelo radiômetro CIMEL-313/22, que é composto de uma unidade de controle e armazenamento de dados e de uma cabeça ótica com campo ou geometria de visada de 10° (FOV=10°), responsável pela detecção e filtragem da Radiação Refletida por um alvo de acordo com as bandas ou filtros descritos na Tabela 8.

Tabela 8. Definições dos filtros do radiômetro de luminescência CIMEL-313/22 (com os códigos adotados na análise dos resultados entre parênteses).

Filtro	Centro(nm)	Largura(nm)	Início(nm)	Fim(nm)	Faixa do Espectro	Detector
F1 (F)	837	91	791,5	882,5	Infravermelho Próximo	Silício
F2 (G)	648	53	621,5	674,5	Vermelho	Silício
F3 (H)	548	85	505,5	590,5	Verde	Silício
F4 (I)	450	40	430,0	470,0	Azul	Silício
F6 (J)	837	91	791,5	882,5	Infravermelho Próximo	Germânio

Os filtros analisados ao longo deste capítulo foram apenas o Filtro 1 (F) e o Filtro 2 (G), visto que os Índices de Vegetação mais utilizados e os avaliados no Capítulo 4 baseiam-se exclusivamente nas faixas ou bandas do vermelho e do infravermelho próximo do espectro

luminoso. Embora o Filtro 6 (J) tenha exatamente a mesma faixa de amostragem que o Filtro 1 (F), ele não foi utilizado, pois o sensor de germânio apresenta variações e valores diferentes dos do sensor de silício. Como o Filtro 2 (G) também é de silício e eles precisam ser comparados para se obter os Índices de Vegetação, o Filtro 6 (J) não pôde ser usado, pois produziria resultados inconsistentes. Essa comparação foi, portanto, sempre feita com o Filtro 1 (F).

As medidas foram tomadas posicionando-se a cabeça ótica em uma haste telescópica em L invertido, na qual ela era presa a um sistema com eixo móvel que permitia que ela assumisse a visada zenital por efeito do seu próprio peso, ficando perpendicular ao nível horizontal do local, como um fio de prumo utilizado na construção civil. O valor medido não era a Refletância da superfície, mas sim a Radiação Total Refletida pela superfície, separada por cada um dos filtros. Também não era dado em uma unidade de energia como, por exemplo $W/m^2/min$, mas em contagem de pulsos eletrônicos que, caso calibrada com algum outro aparelho, poderia ser convertida por meio de um fator multiplicativo. Porém, para as medidas de Refletância essa conversão não é necessária, pois, na Equação 8 pode-se perceber que esse fator de conversão se anularia no caso de se usar apenas um aparelho ou estaria embutido no Fator de Intercalibração, caso fossem usados dois aparelhos diferentes simultaneamente.

3.2.2. Radiação Incidente

Discutiu-se acima que, para a estimativa da Refletância da superfície é necessário que se compare a Radiação Refletida pela superfície com a Radiação Incidente sobre ela. Esta última foi medida aqui de duas formas, descritas a seguir.

3.2.2.1. Método do Espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800

O Aparelho LI-COR/LI-1800 é composto por: um receptor co-seno, que capta a energia de acordo com o co-seno do ângulo de incidência (segue a lei dos co-senos de Lambert) e que seja proveniente de qualquer ângulo do hemisfério de amostragem; uma roda de filtros, que realiza uma filtragem separando a energia por regiões do espectro fazendo uma pré-seleção

e evitando erros provocados pela entrada de outras faixas que não a de interesse naquele instante, além de fornecer uma referência negra; um monocromador, que dispersa a radiação pré-selecionada em bandas estreitas por meio de um difrator holográfico, passando-as para o detector; e por um detector de fotodiodo de silício, que produz uma corrente proporcional à quantidade de energia recebida e a converte em voltagem, passando-a para o microcomputador interno. Todo o sistema é mantido por uma bateria interna de níquel-cádmio. A operação pode ser feita por um teclado portátil ou por um computador pessoal comunicando-se com o aparelho através de uma saída serial (RS232) (LI-COR, 1989). A Figura 13 apresenta um diagrama esquemático desse aparelho.

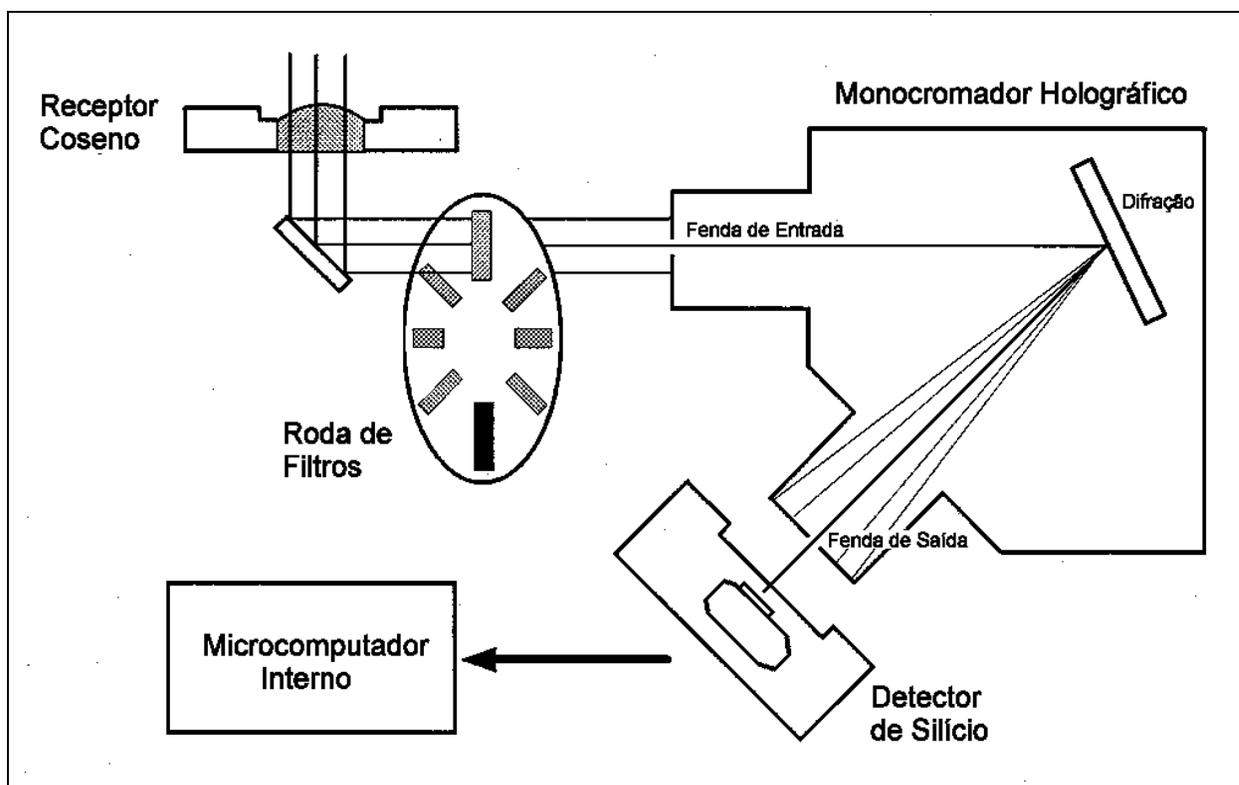


Figura 13. Diagrama operacional do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 (Adaptado de LI-COR, 1989).

O método que utiliza esse aparelho foi adotado em todas as campanhas incluídas nessa análise de Refletância, ou seja, a partir da campanha 6. Ele se baseia na utilização do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 medindo a radiação global Incidente sobre a área de estudo com o sensor co-seno ou hemisférico, de forma a captar a radiação num ângulo

sólido de $2\pi sr$ que, neste estudo, representou a abóbada celeste acima do aparelho. Sendo assim, o aparelho foi posicionado acima de qualquer obstáculo ou objeto refletor que pudesse barrar ou refletir radiação para o sensor, influenciando a medida. Por isso, o aparelho sempre foi instalado em nível no topo de uma escada e com um novo cabo de fibra ótica em um suporte mais alto, quando necessário. A Figura 14 ilustra essa medida.

Esse aparelho foi programado para obter medidas automaticamente a cada quinze minutos e seu relógio foi acertado com o do operador do aparelho CIMEL-313/22 para que as medidas de Radiação Refletida fossem feitas sempre nesses horários pré-programados, garantindo a simultaneidade das medidas.

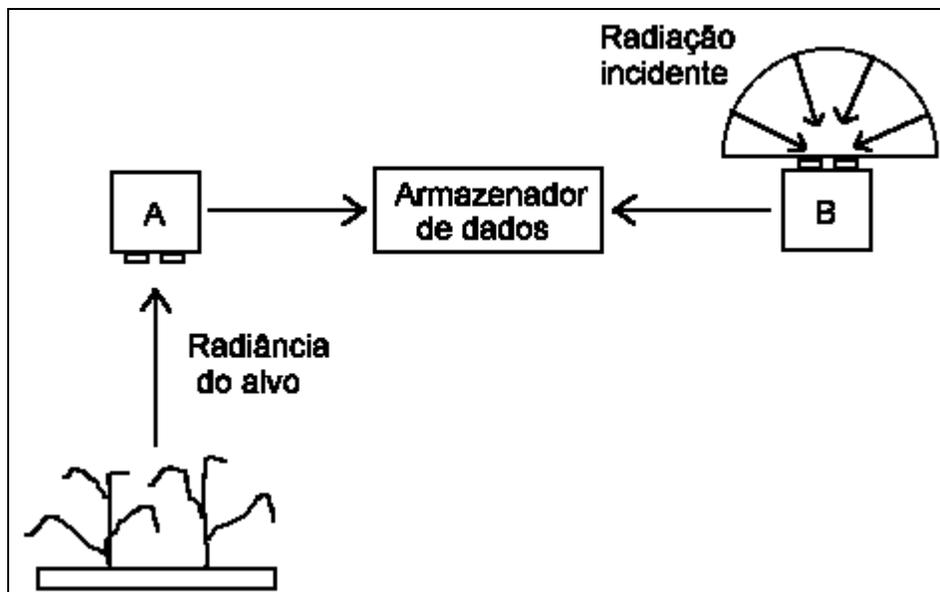


Figura 14. Medida da Radiação Refletida pela cultura por meio do radiômetro CIMEL-313/22 (A) e da Radiação Incidente por meio do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 (B) com o sensor co-seno (Adaptado de DUGGIN & CUNIA, 1983).

3.2.2.2. Método da Placa de Sulfato de Bário

Neste método mediu-se a Energia Refletida por uma placa de sulfato de bário ($BaSO_4$), que se comporta como padrão de uma superfície lambertiana isotrópica, ou seja, independente do ângulo de incidência a radiação é homoganeamente refletida em todas as direções. A Eficiência de Reflexão da placa fica em torno de 90% (HAMADA, 2000) e representa a medida da Radiação Incidente sobre a superfície vegetal. Em seguida foi realizada a medida da Radiação Refletida pela cultura, que foi dividida pela Radiação Refletida pela placa corrigida pelo seu fator de Refletância ou Eficiência, e assim se obteve a Refletância de Campo da superfície, como ilustrado pela Figura 15.

Portanto, de posse dos dados obtidos pelo aparelho CIMEL, o cálculo do Fator de Refletância das superfícies medidas foi feito da seguinte forma:

$$R = \frac{ER_s}{EI} = \frac{Cont_s * F}{Cont_p * \varepsilon * F} = \frac{Cont_s}{Cont_p * \varepsilon} \quad (9)$$

onde, R é a Refletância da superfície;

ER_s é a Energia refletida pela superfície;

El é a Energia Incidente sobre a placa de $BaSO_4$;

$Cont_s$ é o valor ou Contagem fornecida pelo aparelho para a medida da superfície;

$Cont_p$ é o valor ou Contagem fornecida pelo aparelho para a medida da placa no mesmo momento;

F é o Fator de Conversão da Contagem do aparelho para unidade de energia; e

ε é a Eficiência de Reflexão da placa.

Como os valores de $Cont_s$ e $Cont_p$ foram ambos fornecidos pelo mesmo aparelho CIMEL-313/22, não foi necessário usar o Fator de Intercalibração de aparelhos definido na Equação 8 apresentada no item anterior e, para calcular a Refletância da superfície, bastou utilizar valores de ε . Esses valores de ε para a placa utilizada foram medidos em laboratório para 350 pontos do espectro eletromagnético por meio do espectrorradiômetro LI-COR e

esses pontos foram integrados para a faixa de sensibilidade dos filtros do radiômetro CIMEL de maneira a se obter a Eficiência Média (ϵ_m) para cada uma deles.

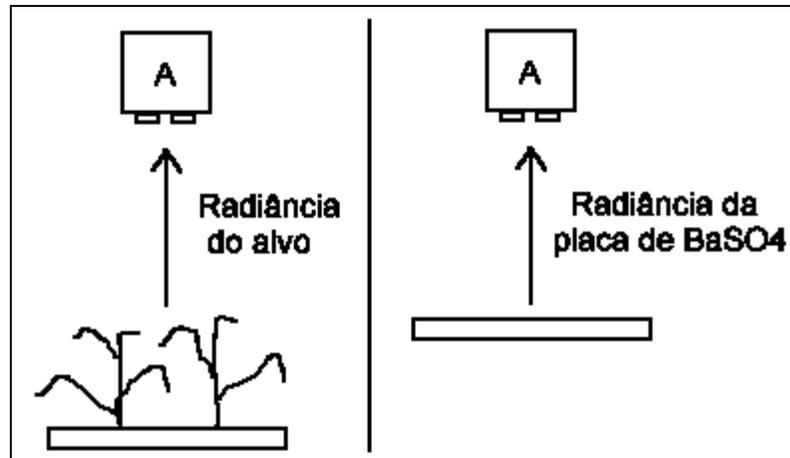


Figura 15. Medida da Radiação Refletida pela cultura e pela placa de BaSO_4 por meio do mesmo radiômetro CIMEL-313/22. Uma medida é feita imediatamente após a outra (Adaptado de DUGGIN & CUNIA, 1983).

Outra forma de se aplicar esse método da placa de sulfato de bário consiste em se utilizar dois radiômetros de mesma geometria de visada, por exemplo, dois radiômetros CIMEL-313/22. Dessa forma evita-se o risco de se medir os dois valores em condições diferentes da atmosfera, como comentado no item 3.2. Porém, é necessário estimar o Fator de Intercalibração entre os dois aparelhos, pois mesmo sendo eles do mesmo modelo e geometria, cada sensor tem uma Eficiência. Utilizando-se de um segundo radiômetro CIMEL-313/22⁴, foi possível testar esse método nas campanhas finais, porém as suas medidas foram usadas apenas para checagem da qualidade dos dados, não fazendo parte das análises apresentadas nos itens seguintes. A intercalibração dessa forma de medida está ilustrada na Figura 17, no item seguinte.

⁴ Esse radiômetro do CEPAGRI/UNICAMP só foi obtido já próximo do final do último ciclo, nas últimas campanhas.

3.2.3. Intercalibração dos Aparelhos para Cálculo da Refletância

A medida da Radiação Incidente com a placa de sulfato de bário foi feita apenas nas duas últimas campanhas. Simultaneamente, continuou sendo medida a Radiação Incidente pelo espectrorradiômetro para gerar dados para se fazer a intercalibração dos dois aparelhos de acordo com o método apresentado por DUGGIN & CUNIA (1983), conforme descrito a seguir.

Foram medidas, simultaneamente, a Radiação Global Incidente e a Radiação Refletida pela placa de sulfato de bário ($BaSO_4$). Para o primeiro tipo de medida utilizou-se o espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800, como realizado nas demais campanhas. Para o segundo utilizou-se o radiômetro de luminescência CIMEL-313/22 voltado para baixo, como nas medidas da Radiação Refletida pela vegetação, porém medindo a Radiação Refletida pela placa padrão de sulfato de bário, como mostra a Figura 16.

Com esse método, para se obter o valor de Energia Incidente (EI) das equações acima, o que se pretendeu foi estimar os valores de Radiação Refletida pela placa para cada filtro do radiômetro de luminescência CIMEL-313/22 a partir dos dados obtidos pelo espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800, usado em todas as campanhas, e dividi-los pela Eficiência da placa. Como o espectrorradiômetro faz uma varredura de 2nm em 2nm na faixa de 330nm a 1100 nm, primeiramente, foi necessário integrar os seus valores de acordo com os filtros do radiômetro de luminescência CIMEL-313/22 definidos na Tabela 8 (nela o filtro F5 não foi apresentado pois está fora da faixa de varredura do aparelho LI-COR). Feito isso, dispunha-se de 34 pares dessas medidas para cada filtro.

Esses pares de dados foram introduzidos no programa AJUSTE, desenvolvido por ZULLO Jr. & ARRUDA (1986), que gera 17 tipos diferentes de modelos de regressão. Os modelos de melhor ajuste para cada filtro, ou banda, e seus Coeficientes de Determinação (R^2) estão apresentados na Tabela 9, onde LI representa os valores medidos pelo espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 e CI os estimados para a medida da placa do radiômetro CIMEL-313/22.

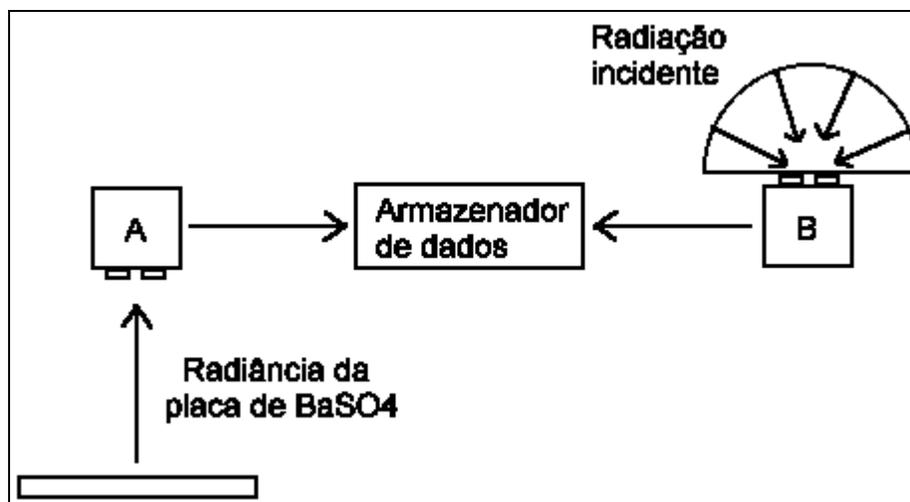


Figura 16. Intercalibração do radiômetro CIMEL-313/22 (A) e do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 (B) por meio da placa de sulfato de bário ($BaSO_4$) (Adaptado de DUGGIN & CUNIA, 1983).

Tabela 9. Modelos de regressão para estimar medidas de Radiação Refletida pela placa de sulfato de bário para o radiômetro CIMEL-313/22 a partir dos dados de Radiação Global Incidente do espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800, para cada filtro. CI é o valor estimado para o aparelho CIMEL e LI o valor da Radiação Incidente medido pelo espectrorradiômetro LI-COR.

Filtro	Modelo	R ²
F1	$CI = 75403,49 * LI / (2502154 + LI)$	0,8911
F2	$CI = 48834,23 * LI / (2642013 + LI)$	0,8649
F3	$CI = 69476,33 * LI / (3961053 + LI)$	0,8949
F4	$CI = 34756,67 * LI / (1167378 + LI)$	0,9101
F6	$CI = 74850,66 * LI / (4290981 + LI)$	0,8538

Com base nesses modelos de regressão, foram estimados os valores das medidas das Radiâncias das placas para o radiômetro CIMEL-313/22 e calculados os valores de Refletância para cada filtro de cada medida das campanhas 6 a 14, nas quais esse aparelho foi utilizado.

O método de estimativa da Refletância utilizando dois radiômetros de mesma geometria de visada, descrito no item anterior, necessita de um Fator de Intercalibração que pode ser estimado fazendo-se medidas simultâneas com duas placas de sulfato de bário, cada uma

com sua Eficiência Média (ϵ_m) determinada para cada um dos filtros, conforme ilustra a Figura 17. Não foram apresentados os fatores ou equações de intercalibração porque esse método não foi utilizado para gerar os dados das análises realizadas nos itens a seguir.

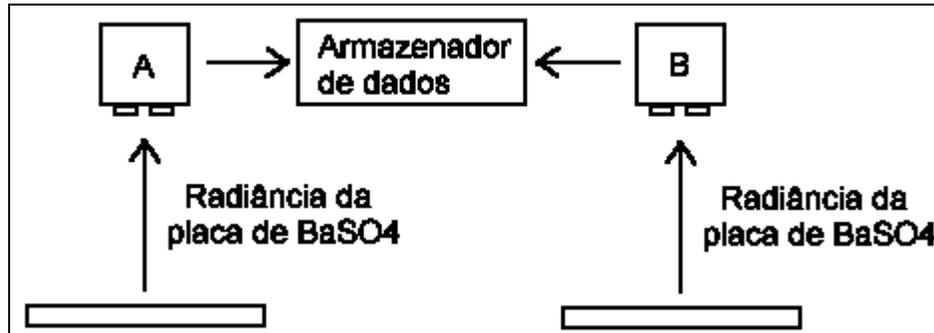


Figura 17. Intercalibração de dois aparelhos CIMEL-313/22 (A e B) por meio de duas placas de sulfato de bário ($BaSO_4$) (Adaptado de DUGGIN & CUNIA, 1983).

3.2.4. Resultados da Refletância de Campo

Logo após o cálculo dos valores de cada medida da Refletância, e antes de se obter a média para cada parcela ou para cada campanha, levantou-se a hipótese de que poderia haver variação nas medidas de Refletância da cultura com a variação do Ângulo Solar, ao longo do dia. Dados apresentados por ROSENBERG (1974) mostram que a Refletância em gramíneas tende a ser maior com maior ângulo zenital do Sol. Baseado em JACKSON et al. (1979), COLWELL (1974) e KIMES (1983), MOREIRA (2000) descreve que "com grandes ângulos zenitais de iluminação, a radiação penetra no dossel e encontra uma camada espessa de folhas, provocando uma alta Refletância devido à ocorrência de múltipla reflexão entre os constituintes do dossel. Para ângulos zenitais menores, a radiação intercepta uma camada mais fina de folhas, tornando esse efeito, e conseqüentemente a Refletância, menores."

Uma análise preliminar dessa tendência foi feita por meio de regressão linear simples para três das campanhas realizadas (campanhas 8, 13 e 14). Os dados obtidos exclusivamente⁵ para essa análise de tendência no dia 4 de novembro de 1998 (campanha 8) foram os mais detalhados, pois se manteve um segundo radiômetro CIMEL-313/22 fixo num só ponto de amostragem, dentro da parcela 3, tomando medidas a cada dois minutos, sempre com visada nadiral. Essas medidas foram realizadas no período das 13h30min às 16h30min, totalizando 88 pontos.

Os valores obtidos estão representados na Figura 18 e, aparentemente, não apresentam tendência bem definida, o que seria detectado pela inclinação mais acentuada da reta obtida ou, por desvios maiores e para mais nos valores obtidos com maior Ângulo Solar, caso a Refletância aumentasse como esperado. Ao contrário, o que se observa é uma tendência muito pequena de queda com o aumento do Ângulo de Inclinação Solar. Uma menor variação e valores um pouco mais elevados podem ser percebidos próximo às 15h, provavelmente por outros fatores que não o Ângulo de Inclinação Solar como, por exemplo, o ângulo de inclinação das folhas ou a disposição das linhas de plantio em relação à luz incidente.

Outro fator que poderia influenciar essas medidas é a variação diária normal da temperatura do ar, que em torno das 15h atinge seu máximo, podendo afetar o comportamento foliar ou até o funcionamento do próprio aparelho de medida. Porém, não se encontrou citação na literatura consultada e nem foi possível obter medidas que comprovassem qualquer dessas hipóteses. Essa leve elevação dos valores próxima às 15h foi seguida por uma queda sensível, contrariando a tendência observada em gramíneas por ROSENBERG (1974) e no trigo por JACKSON et al. (1979), citados por MOREIRA (2000).

⁵ Cabe ainda destacar que os dados obtidos com essas medidas do segundo radiômetro CIMEL-313/22 não foram utilizados para compor os valores das médias apresentadas a seguir, pois alteraria sobremaneira o peso da parcela 3 na composição da média final.

As medidas das campanhas 13 e 14, dias 11 de julho e 25 de agosto de 1999, foram realizadas também praticamente o dia todo, das 7h00min às 17h30min, porém ao longo das parcelas de amostragem, isto é, sem um ponto fixo de amostragem. Isso inclui uma variação espacial nos resultados que provoca uma variação na Refletância muito maior do que a provocada pela variação no Ângulo de Incidência Solar, mascarando a influência deste último fator. Apesar disso, os valores obtidos apresentaram praticamente o mesmo comportamento do dia 4 de novembro, ou seja, praticamente sem tendência ou com uma leve tendência de queda no final do período. As retas apresentaram pontos e erros bem distribuídos e inclinações praticamente insignificantes.

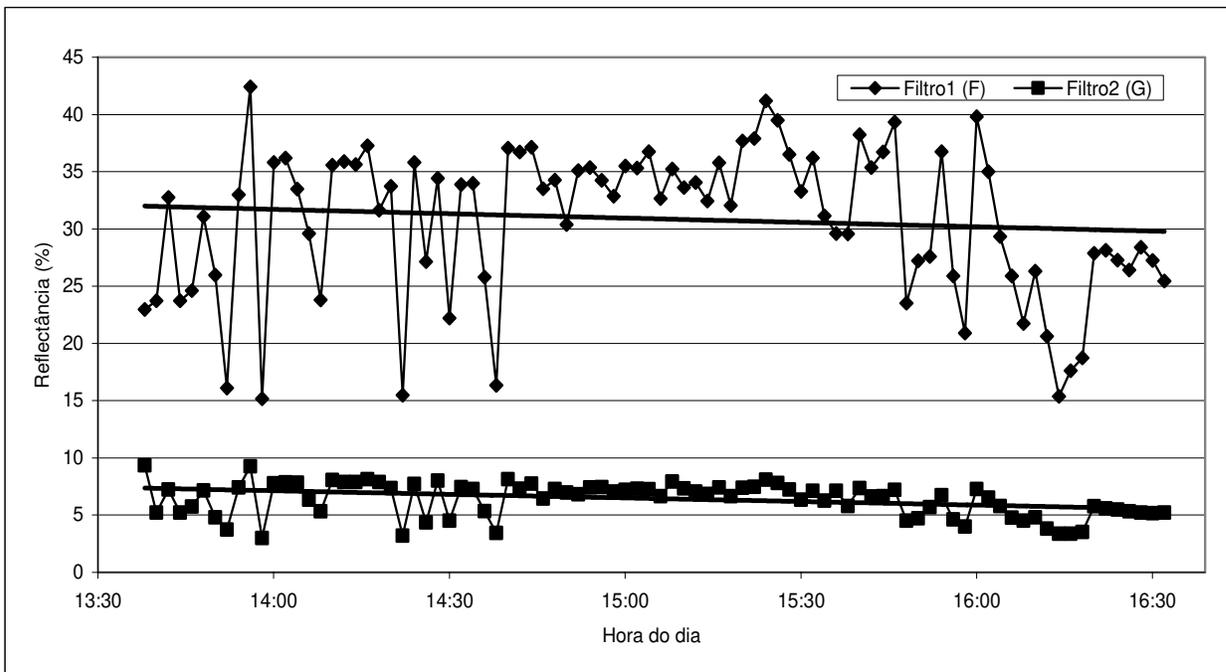


Figura 18. Variação da Refletância ao longo da tarde do dia 04 de novembro de 1998, num ponto fixo na parcela 3.

Portanto, em princípio não se pôde confirmar a hipótese de que exista uma tendência bem definida para a variação da Refletância na cultura da cana-de-açúcar ao longo do dia e, se ela existe, parece não ter o comportamento esperado citado na literatura para outras espécies. Essa conclusão, porém, não pôde ser bem fundamentada aqui e exigiria um estudo mais detalhado sobre essas variações. Apesar disso, optou-se por adotar uma média de Refletância incluindo todos os valores tomados ao longo do dia, o que representa melhor

a variação espacial na área de estudo. Porém, deu-se um peso maior para as medidas na hora da passagem do satélite, por meio de um número maior de medidas incluídas na média final.

Com base no exposto, definiu-se que o valor a ser utilizado nas análises seria a média das Refletâncias de campo, obtidas nas cinco parcelas ao longo de todo o dia, em cada uma das campanhas. Assim, posteriormente, essa média poderia ser comparada à Refletância obtida a partir do *pixel* das imagens NOAA14/AVHRR disponíveis para as mesmas datas, como discutido no Capítulo 4.

Na seqüência, são apresentadas três tabelas com as médias e outras estatísticas descritivas da Refletância. Nessas tabelas a coluna "Medida" recebe a notação "FddmmaaP" para definir os filtros, datas e parcelas. Nessa notação, "F" representa o filtro variando entre F e G, para o Filtro1 ou 2, respectivamente, como já apresentado na Tabela 8, "ddmmaa" representa a data da coleta com dia (dd), mês (mm) e ano (aa) e "P" representa o número da parcela, que assume valores de 1 a 5 e M (para a média das parcelas).

A Tabela 10 e a Tabela 11 mostram as médias de cada parcela para cada campanha, para os Filtros 1 (F) e 2 (G), respectivamente. Percebe-se nessas tabelas que o Coeficiente de Variação (C.V.), representado na última coluna, é relativamente alto. Como já descrito no item 3.2, o método de amostragem procurou incluir a máxima variação possível dentro de cada parcela, para compor uma média que representasse a integração da Radiação Refletida que é captada pelo sensor do satélite. Isso explica os altos valores de Coeficiente de Variação, que foram, portanto, provocados intencionalmente.

Outra informação que se pode extrair, principalmente da Tabela 10, é que o aumento do número de medidas, normalmente ocorrido na parcela 3, tende a provocar um aumento do Coeficiente de Variação, o que mostra que o número de medidas dentro de cada parcela é insuficiente para representar a sua variabilidade, pois ainda não houve uma estabilização desse Coeficiente. Isso reforça a afirmação de GU at al. (1990), citado por ZULLO Jr. (1994), de que é necessário cerca de uma centena de medidas para se obter

Tabela 10. Estatísticas descritivas da Refletância (%) no Filtro 1 (F), nas parcelas 1 a 5, para cada campanha.

Medida	Nº Obs	Média	Mínimo	Máximo	Desv.	C.V. (%)
F2306981	3	42,34	26,68	66,35	21,11	49,85
F2306982	4	24,99	22,13	26,85	2,20	8,80
F2306983	6	24,34	7,77	52,09	14,71	60,46
F2306984	5	25,55	16,62	31,08	5,99	23,46
F1708981	5	68,29	47,92	82,57	15,11	22,13
F1708983	4	60,93	46,44	98,65	25,26	41,45
F1708985	4	8,20	5,48	11,15	2,82	34,39
F0511981	5	27,40	15,43	35,07	7,35	26,84
F0511982	5	25,71	20,16	31,56	4,98	19,38
F0511983	30	28,16	14,45	50,32	8,12	28,85
F0511984	2	75,61	67,89	83,32	10,91	14,43
F0511985	5	23,93	12,62	35,21	10,54	44,06
F2411981	6	37,41	15,39	48,54	11,62	31,05
F2411982	5	36,77	7,56	88,82	31,58	85,87
F2411983	9	32,70	16,90	52,48	12,27	37,53
F2411985	5	36,25	15,35	62,84	21,28	58,70
F2501991	7	46,09	27,65	65,84	13,32	28,89
F2501992	6	41,68	26,94	60,90	12,26	29,41
F2501993	16	35,47	9,90	50,48	12,07	34,03
F2501994	6	43,01	34,51	54,45	8,11	18,86
F2501995	6	39,79	18,44	59,50	14,12	35,49
F2803991	12	31,15	19,90	46,38	8,54	27,42
F2803992	11	38,63	27,87	56,16	8,56	22,17
F2803993	12	29,55	15,45	49,14	10,32	34,92
F2803994	10	34,89	22,26	44,86	8,37	24,00
F2803995	11	28,70	14,77	37,81	8,44	29,39
F2605991	6	26,51	21,95	30,55	3,52	13,30
F2605992	5	24,39	14,66	35,08	8,48	34,78
F2605993	9	29,36	17,49	41,01	9,47	32,26
F2605994	5	43,87	20,99	60,31	14,74	33,60
F2605995	9	32,15	19,75	45,96	9,51	29,58
F1107991	9	20,77	9,05	34,32	8,34	40,16
F1107992	10	38,19	18,79	68,99	14,78	38,70
F1107993	21	40,16	9,89	97,97	24,56	61,15
F1107994	4	35,20	23,20	58,02	16,20	46,03
F1107995	5	23,30	13,16	36,87	8,95	38,40
F2508991	5	37,62	25,89	51,54	11,06	29,39
F2508992	8	40,98	33,87	56,20	7,57	18,48
F2508993	18	32,11	10,16	85,49	20,36	63,41
F2508994	10	29,46	18,12	48,66	11,21	38,06
F2508995	14	30,75	11,74	55,06	11,05	35,93

Tabela 11. Estatísticas descritivas da Refletância (%) no Filtro 2 (G), nas parcelas 1 a 5, para cada campanha.

Medida	Nº Obs	Média	Mínimo	Máximo	Desv.	C.V. (%)
G2306981	3	7,35	5,52	9,89	2,27	30,87
G2306982	4	4,02	2,74	5,58	1,17	29,17
G2306983	6	1,70	0,71	3,91	1,15	67,75
G2306984	5	3,53	3,04	4,25	0,53	14,88
G1708981	5	7,62	5,16	9,28	1,65	21,64
G1708983	4	10,43	8,55	15,92	3,66	35,08
G1708985	4	3,10	1,81	4,48	1,28	41,26
G0511981	5	6,21	4,31	8,46	1,53	24,62
G0511982	5	9,59	6,63	11,59	2,18	22,74
G0511983	30	7,02	3,00	10,14	1,63	23,25
G0511984	2	31,89	29,13	34,65	3,90	12,24
G0511985	5	7,86	3,31	13,11	4,39	55,92
G2411981	6	7,36	5,31	9,03	1,55	21,01
G2411982	5	5,36	1,98	11,92	3,84	71,67
G2411983	9	6,17	3,74	8,75	1,86	30,22
G2411985	5	4,79	3,58	5,83	1,04	21,78
G2501991	7	5,68	3,83	9,29	1,85	32,55
G2501992	6	5,39	4,06	7,53	1,32	24,51
G2501993	16	4,44	2,09	7,35	1,63	36,70
G2501994	6	6,55	3,71	10,69	2,67	40,78
G2501995	6	6,12	4,22	10,58	2,38	38,84
G2803991	12	4,55	2,58	7,84	1,84	40,38
G2803992	11	7,96	5,66	10,66	1,67	20,94
G2803993	12	2,95	1,32	6,83	1,77	59,92
G2803994	10	4,57	2,47	6,97	1,55	33,98
G2803995	11	4,13	2,26	7,02	1,66	40,23
G2605991	6	3,66	3,17	5,19	0,77	21,02
G2605992	5	4,02	2,19	5,21	1,17	29,14
G2605993	9	3,80	2,27	5,50	1,11	29,33
G2605994	5	6,57	2,33	10,61	3,14	47,82
G2605995	9	4,94	2,55	6,67	1,51	30,57
G1107991	9	4,62	1,41	9,12	2,77	59,81
G1107992	10	5,26	1,23	9,63	2,37	45,17
G1107993	21	3,89	1,48	11,61	2,31	59,52
G1107994	4	5,43	4,46	6,43	0,90	16,57
G1107995	5	4,97	2,38	7,60	2,21	44,44
G2508991	5	11,47	9,22	13,83	1,64	14,34
G2508992	8	14,17	8,56	18,17	3,66	25,84
G2508993	18	6,44	2,44	12,33	3,00	46,57
G2508994	10	8,62	4,29	15,97	4,00	46,34
G2508995	14	10,30	4,89	20,70	3,93	38,12

bons dados de Refletância. Porém, como já discutido, isso não pôde ser colocado em prática neste trabalho.

Neste item não houve o interesse de avaliar as diferenças entre as parcelas. Ao contrário, o que se buscou aqui foi obter uma média que representasse a área como um todo. Assim, a Tabela 12 mostra uma síntese das campanhas, apresentando estatísticas descritivas das médias da Refletância, representadas pela parcela M e que foram definidas como os valores de maior interesse, pois foram usadas para o cálculo dos Índices de Vegetação, combinando o Filtro 1 (F) e o Filtro 2 (G) do radiômetro CIMEL-313/22.

Tabela 12. Estatísticas descritivas da Refletância (%) das campanhas, na parcela M, para os Filtros 1 (F) e 2 (G).

Medida	Nº Obs	Média	Mínimo	Máximo	Desv.	C.V. (%)
F230698M	4	29,31	24,34	42,34	8,70	29,70
F170898M	3	45,81	8,20	68,29	32,77	71,55
F051198M	5	36,16	23,93	75,61	22,11	61,15
F241198M	4	35,78	32,70	37,41	2,11	5,89
F250199M	5	41,21	35,47	46,09	3,94	9,57
F280399M	5	32,59	28,70	38,63	4,13	12,67
F260599M	5	31,26	24,39	43,87	7,63	24,43
F110799M	5	31,52	20,77	40,16	8,89	28,20
F250899M	5	34,18	29,46	40,98	4,91	14,36
G230698M	4	4,15	1,70	7,35	2,36	56,81
G170898M	3	7,05	3,10	10,43	3,70	52,46
G051198M	5	12,51	6,21	31,89	10,90	87,14
G241198M	4	5,92	4,79	7,36	1,12	18,85
G250199M	5	5,63	4,44	6,55	0,80	14,22
G280399M	5	4,83	2,95	7,96	1,87	38,67
G260599M	5	4,60	3,66	6,57	1,21	26,34
G110799M	5	4,83	3,89	5,43	0,61	12,65
G250899M	5	10,20	6,44	14,17	2,92	28,61

Analisando-se os Coeficientes de Variação apresentados na última coluna dessa tabela, também se observam valores altos provocados intencionalmente, visto que as parcelas foram escolhidas justamente para representar a variabilidade entre "sub-regiões" dentro da área de amostragem. Pode-se perceber ainda que esses Coeficientes são mais altos, principalmente quando a porcentagem de cobertura do terreno pelas folhas ainda não é suficiente para evitar a influência do brilho do solo com restos de palha do ciclo anterior, o que ocorre no início do ciclo, quando podem existir diferenças na fase de estabelecimento da

cultura entre uma parcela e outra, aumentando o Coeficiente de Variação. Também são maiores na entrada da fase de senescência das folhas, quando ocorre o enchimento dos colmos e a quantidade de folhas verdes diminui e a palhada ou folhas secas tornam-se visíveis, passando a influenciar o valor da Refletância da superfície no final do ciclo, podendo haver uma maior variação no comportamento das diferentes parcelas.

Com base nisso, pode-se concluir que as fases de estabelecimento e senescência das folhas, isso é, antes e depois da fase mais linear e contínua do crescimento vegetativo, apresentam maior variação da Refletância, o que provoca uma maior variação nos Índices de Vegetação de Campo e Orbitais obtidos. Portanto, quando o objetivo é estimar a Fitomassa, ou Massa Seca, dos Colmos a partir de Índices de Vegetação, deve-se evitar essas fases na obtenção desses índices. Essa conclusão está em pleno acordo com o apresentado no item 2.6, onde se sugere a metade do ciclo como época mais aconselhada para a coleta das medidas que levarão à estimativa da Produção Final do ciclo.

Baseando-se nos dados do campo da coluna "Média" da Tabela 12, apresentaram-se, na Figura 19, as variações da Refletância média das parcelas ao longo das campanhas.

Um detalhe interessante pode ser percebido nos finais do segundo e do terceiro ciclo, de 23/06 a 17/08/1998 (corte 17/08/1998) e de 11/07 a 25/08/1999 (corte 06/10/1999), respectivamente. Com a senescência das folhas e o acúmulo de palhada, o comportamento da Refletância começou a se alterar, provocando ligeiro aumento, tanto no Filtro 1 (Infravermelho Próximo) como no Filtro 2 (Vermelho). O aumento no Vermelho pode ser explicado pela diminuição da concentração dos pigmentos foliares ao longo da senescência, provocando uma diminuição da absorção, e conseqüente aumento da reflexão, como também ressaltam ASRAR et al. (1984) e MOREIRA (2000). Segundo este último autor, a Refletância no Infravermelho Próximo representa a estrutura interna da folha, com seus espaços intercelulares, que deveriam diminuir com a senescência e a conseqüente perda de água, diminuindo a Refletância.

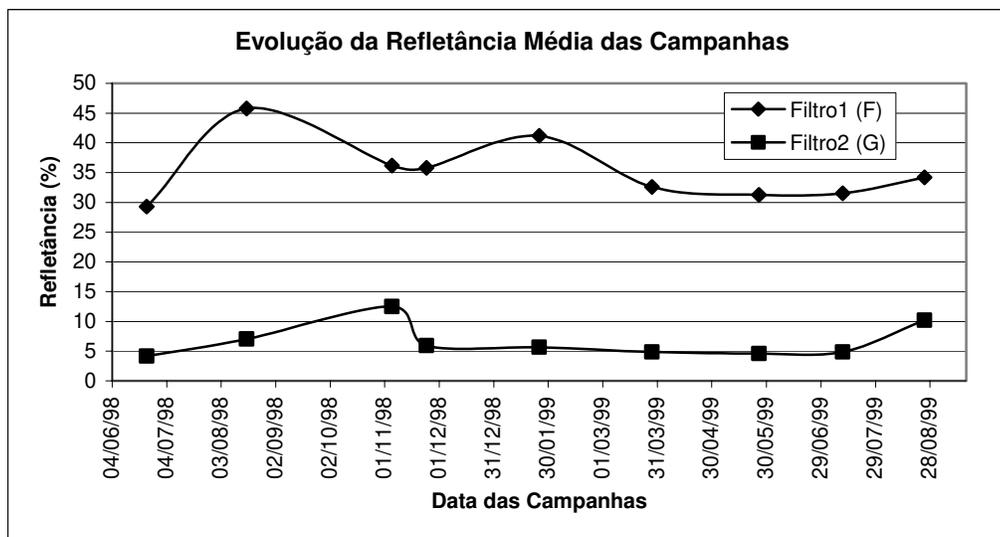


Figura 19. Variação da Refletância média ao longo das campanhas para os Filtros 1 (F) e 2 (G) do radiômetro CIMEL-313/22.

Como se percebe na Figura 19 porém, o inverso foi observado. Talvez porque a folha da cana, com a senescência e o conseqüente secamento, se transforme numa estrutura coriácea, rígida e brilhante, mais capaz de refletir diretamente a luminosidade recebida nessa faixa do espectro. Como já discutido acima neste mesmo item, o dossel da cana-de-açúcar também apresentou um comportamento diferente do observado na literatura para outras culturas, em relação ao ângulo de incidência Solar, possivelmente também por influência da palhada. Uma análise mais detalhada dessas diferenças entre o comportamento espectral da folha verde e da palhada poderia ser feita utilizando-se uma esfera integradora acoplada ao espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800. Isso seria importante para se determinar se a cana-de-açúcar realmente apresenta esse comportamento anômalo em relação às outras culturas citadas na literatura e para se detectar as suas causas. Sugere-se que se realizem estudos posteriores, com uma amostragem de dados mais detalhada do que a feita aqui para este trabalho.

Outro ponto que se pode discutir a partir desse gráfico é o período logo após o corte do segundo ciclo, de 17/08 a 24/11/1998. Pode-se perceber que após o corte, com a maior exposição do solo, houve também alteração do comportamento dos dois filtros. Para o Vermelho, também nesse período, houve um aumento da Radiação Refletida que deixou de

ser absorvida pelos pigmentos foliares. Associado a isso, houve uma queda na Radiação Refletida no Infravermelho Próximo, provocando uma menor diferença entre os dois filtros e, conseqüentemente, menores valores de Índices de Vegetação apresentados a seguir.

3.3. Índices de Vegetação Analisados

É importante ressaltar que, como já discutido anteriormente, é recomendado que se utilize dados de Refletância ao invés de dados brutos de contagens de pulsos eletrônicos, como os do aparelho usado em terra, ou dos níveis de cinza, das imagens do satélite (BARET & GUYOT, 1991; GUTMAN, 1991; MORAN et al., 1991). Portanto, todos os índices calculados neste item baseiam-se em valores de Refletância e, por isso, nas abreviaturas dos nomes das bandas, omitiu-se o símbolo ρ , normalmente usado na literatura especializada para representar a Refletância.

A análise dos valores de Refletância do radiômetro de luminescência CIMEL-313/22, apresentados da Tabela 10 à Tabela 12 e na Figura 19, teve por objetivo permitir o cálculo de Índices de Vegetação que pudessem ser correlacionados com o Índice de Área Foliar e com a Produção de Massa Seca dos Colmos da cultura da cana-de-açúcar, visando a previsão da Produção Final de um determinado ciclo. Os valores dos Filtros 1 e 2 foram combinados para calcular vários Índices de Vegetação, buscando os mais bem correlacionados a esses parâmetros de interesse.

Historicamente, analisando a evolução dos Índices de Vegetação, pode-se dizer que eles passaram por "progressões verticais" e "progressões horizontais". As verticais são mudanças de nível, onde são adicionadas ou consideradas novas variáveis causais ou novas formas de se considerar as respostas espectrais. As horizontais seriam reajustes, progressos ou melhorias, mantendo porém, sua conceituação original.

Assim, baseados na diferença de comportamento espectral entre a vegetação verde e os solos (Figura 20), os Índices de Vegetação iniciaram como uma simples razão de bandas Vermelho/Infravermelho Próximo. Algumas variações como, por exemplo, a simples inversão das bandas para a razão Infravermelho Próximo/Vermelho provocou melhorias na escala e

na representação desses índices. A primeira mudança vertical ou de nível foi a melhoria do contraste entre vegetação e solo e diminuição do efeito do ângulo de iluminação por meio da diferença entre as bandas, normalizada ou dividida pela sua soma. Algumas variações surgiram tentando realizar melhorias e geraram alguns novos índices que levaram, aproximadamente, aos mesmos resultados.

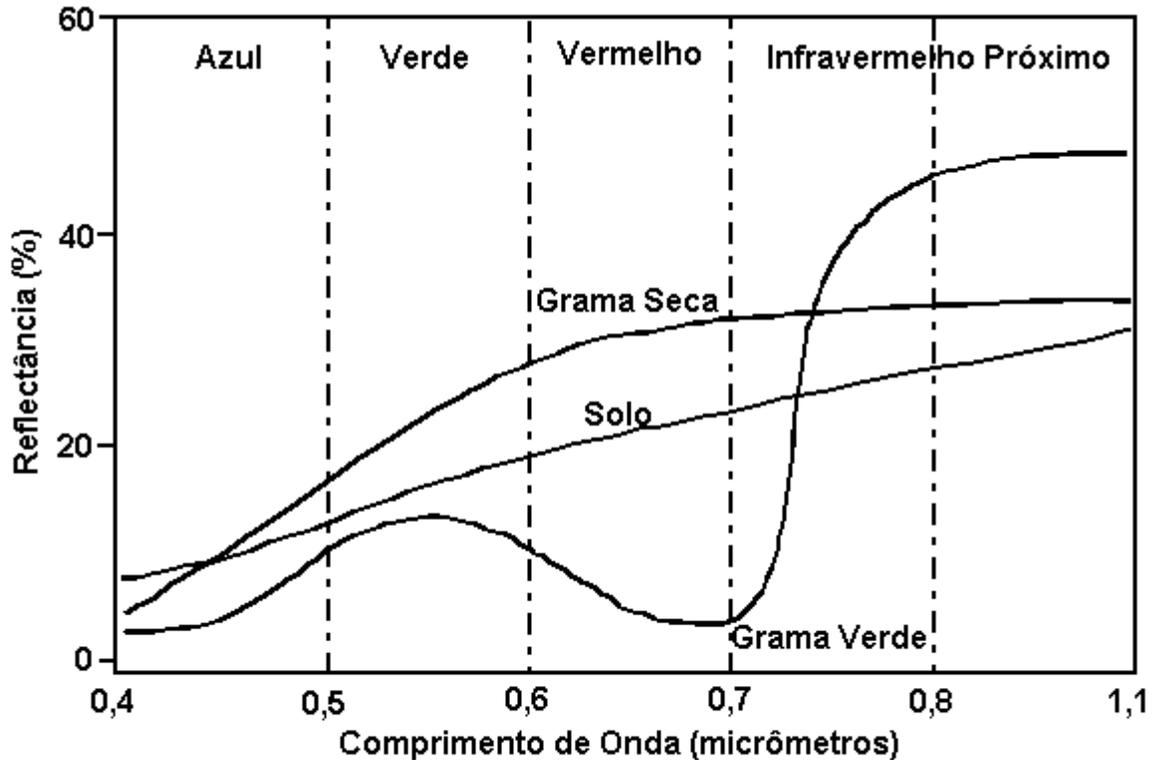


Figura 20. Espectros idealizados para padrões de Refletância de solo, vegetação verde e Seca (Adaptado de PERRY & LAUTENSCHLAGER, 1984).

Outra mudança de nível importante foi a consideração da linha básica do solo nu, calculando-se o distanciamento dos pontos a essa linha à medida que crescia a vegetação, procurando-se minimizar o efeito do solo. Novamente, alguns novos índices surgiram propondo melhorias e ajustes, sem grandes diferenças nos resultados. Um salto paralelo a esse foi a consideração da influência da atmosfera, introduzindo, porém, a necessidade de utilização de uma banda na faixa Azul do espectro eletromagnético. Estes dois últimos tipos

de índices, considerando solo e atmosfera, acabaram sendo unidos e considerados conjuntamente em um mesmo índice, que ainda não tem sido amplamente utilizado.

Esses índices incluindo a atmosfera não foram analisados neste trabalho, pois não existe influência da atmosfera para os dados de campo e, para os dados orbitais apresentados no Capítulo 4, o efeito da atmosfera foi corrigido previamente ao cálculo dos índices, já no cálculo das Refletâncias. Outra família de Índices de Vegetação é baseada em transformações ortogonais das várias bandas originais da imagem, buscando-se sintetizar as causas de variação em outras variáveis ou índices, que também não foram calculados aqui, pois foram elaborados para imagens completas e não para valores pontuais, como os apresentados neste trabalho.

A seguir, são descritos sucintamente os diversos índices calculados, que têm sido os mais utilizados na literatura especializada e que são incluídos no Sistema de Informações Geográficas IDRISI 32 (EASTMAN, 1999), no qual foram realizadas as transformações e análises das imagens orbitais. Da mesma forma, as siglas adotadas aqui para esses índices seguem as de EASTMAN (1999), que na realidade são as já consagradas e de uso geral. Alguns autores como PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER (1984), EASTMAN (1999) e MOREIRA (2000) apresentam um breve apanhado de vários índices e a descrição a seguir se pautou nesses trabalhos, além dos originais para alguns deles, quando disponíveis. Esses autores descrevem dois grupos de índices de acordo com o seu comportamento no espaço bidimensional Vermelho/Infravermelho Próximo, ou seja, num gráfico cartesiano no qual um dos eixos representa a Refletância no Vermelho e o outro a Refletância no Infravermelho Próximo. Na realidade, são as três primeiras "progressões verticais" citadas acima, juntando-se, porém, as duas primeiras num único grupo.

Dessa forma, o primeiro grupo é formado por Índices de Vegetação que são baseados na razão simples de bandas ou de combinações a partir delas. Isso quer dizer que são baseados na inclinação da reta obtida quando os pontos são apresentados nesse espaço bidimensional. O segundo se baseia na determinação de uma reta, que representa os pontos referentes ao solo nu a diferentes umidades, e na distância em relação a essa reta apresentada pelos pontos medidos ao longo do crescimento da cultura. À medida que a

vegetação cresce, mais os pontos se afastam da reta do solo em direção ao eixo que representa o Infravermelho Próximo, pois a vegetação absorve a radiação vermelha diminuindo sua Refletância.

PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER (1984), EASTMAN (1999) e MOREIRA (2000) citam ainda um terceiro grupo chamado de Índices de Vegetação Ortogonais ou de Transformações Ortogonais. Esses índices são obtidos por meio de análise multivariada como, por exemplo, a análise de componentes principais que gera um novo conjunto de variáveis separadas de maneira ortogonal, sendo totalmente independentes entre si e estando relacionadas às principais causas de variação para os *pixels* das bandas do satélite. Como eles são aplicáveis a imagens inteiras, tentando resumir a variação existente entre os *pixels*, não puderam ser aplicados no Capítulo 4, pois a área de estudo se resume a um único *pixel*. Portanto, pelo mesmo motivo, não puderam ser aplicados também aqui sobre as medidas pontuais de Refletância.

3.3.1. Índices de Vegetação Baseados na Razão de Bandas

O mais simples dos Índices de Vegetação é justamente a simples divisão entre a Refletância no Infravermelho Próximo (IVP) e no Vermelho (V), chamada aqui de RATIO. PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER (1984) e EASTMAN (1999) atribuem esse índice a ROUSE et al. (1974), porém MOREIRA (2000) cita JORDAN (1969) como o primeiro autor a propor a razão entre bandas do IVP e V e depois PEARSON & MILLER (1972), também citados por BARET & GUYOT (1991), inverteram a relação, que ficou conhecida com RVI (*Ratio Vegetation Index* - Índice de Vegetação em forma de Razão). O RVI é atribuído por EASTMAN (1999) a RICHARDSON & WIEGAND (1977). As equações para o cálculo ficam então:

$$RATIO = \frac{IVP}{V} \quad (10)$$

$$RVI = \frac{V}{IVP} = \frac{1}{RATIO} \quad (11)$$

Como esses índices são em forma de razão, alguns problemas externos como variação na iluminação como resultado de efeito topográfico são minimizados. Porém, não aceitam a divisão por zero. Além disso, a influência do solo, da atmosfera e da variação sazonal do Ângulo Solar também precisavam ser eliminados e ROUSE et al. (1973 e 1974) propuseram o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) que é dado pela diferença entre as bandas IVP e V normalizada, ou dividida, pela soma dessas duas bandas:

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (12)$$

Esse é o índice que tem sido mais comumente utilizado pois minimiza o efeito topográfico e sua escala varia de -1 a 1, sendo que valores menores ou iguais a zero representam superfícies sem vegetação (EASTMAN, 1999). Um problema freqüentemente relacionado a esse índice é a rápida saturação (MOREIRA, 2000), isto é, com o aumento do Índice de Área Foliar ou da Fitomassa ele rapidamente perde a sensibilidade, estabilizando-se em torno de um valor máximo.

Para obter uma distribuição mais próxima da normal, DEERING et al. (1975), citados por PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER (1984) e EASTMAN (1999), aplicaram uma transformação através da raiz quadrada do NDVI adicionado de 0,5, valor esse utilizado para evitar os valores negativos que produziram erros de cálculo. Esse novo índice foi chamado de TVI (*Transformed Vegetation Index* - Índice de Vegetação Transformado) e é expresso matematicamente por:

$$TVI = \sqrt{\frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} + 0,5} = \sqrt{NDVI + 0,5} \quad (13)$$

Apesar dessa transformação, valores negativos ainda podem ocorrer e tecnicamente não há diferença real entre as imagens geradas pelo TVI e o NDVI. Para evitar esses valores negativos, PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER (1984) propuseram o CTVI (*Corrected*

Transformed Vegetation Index - Índice de Vegetação Transformado Corrigido), que usa valores absolutos na raiz quadrada que, por sua vez, é multiplicada por um fator que corrige o resultado final. As imagens do CTVI deveriam ser similares às do NDVI e do TVI, porém EASTMAN (1999) cita THIAM (1997) que afirma que elas podem ter muitos ruídos, devido à superestimativa da vegetação, e propõe não utilizar a primeira parte da equação, criando o TTVI (*Thiam's Transformed Vegetation Index* - Índice de Vegetação Transformado de Thiam). Esses índices são dados pelas equações:

$$CTVI = \frac{NDVI + 0,5}{ABS(NDVI + 0,5)} * \sqrt{ABS(NDVI + 0,5)} \quad (14)$$

$$TTVI = \sqrt{ABS(NDVI + 0,5)} \quad (15)$$

O último dos índices baseados em razão de bandas calculados neste capítulo é o NRVI (*Normalized Ratio Vegetation Index* - Índice de Vegetação da Razão Normalizada) apresentado por BARET & GUYOT (1984), que na verdade não tinham a intenção de propor um novo índice. Esses autores buscavam apenas definir a relação existente entre o NDVI e o RVI, já que ambos levam à mesma tomada de decisão, como ressaltam PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER (1984), porém com a desvantagem de apresentar valores negativos prejudicando alguns tipos de cálculos. Portanto, partindo-se do NDVI pode-se facilmente chegar a:

$$NRVI = \frac{RVI - 1}{RVI + 1} = -NDVI \quad (16)$$

Na verdade, todos esses índices estão intimamente relacionados, pois o NDVI pode ser obtido a partir do RVI e é a base para o TVI. Os demais são mera transformação desses três, sem contribuir para um melhor esclarecimento ou uma melhor correlação com os parâmetros desejados, como o Índice de Área Foliar e Fitomassa, como mostram as análises dos itens 3.4.1 e 3.4.2.

3.3.2. Índices de Vegetação Baseados na Distância da Reta do Solo

Como já citado acima, esse grupo de índices é baseado na distância perpendicular a uma reta que representa o solo da área de estudo no espaço bidimensional V/IVP e são derivados do PVI (*Perpendicular Vegetation Index* - Índice de Vegetação Perpendicular), que pode ser obtido por meio dos seguintes passos (EASTMAN, 1999):

- determinação da reta do solo⁶ por meio de regressão linear simples entre os valores de Refletância do Infravermelho Próximo (IVP - variável independente) e do Vermelho (V - variável dependente), na forma $V = a_0 + a_1 * IVP$, onde a_0 é o intercepto no eixo do IVP e a_1 é a inclinação da reta;
- após a determinação da reta do solo, é necessário determinar a reta perpendicular a ela que passa pelo ponto (IVP_p, V_p) , representativo do *pixel* de interesse. Essa reta tem a forma, $V_p = b_0 + b_1 * IVP_p$, onde $b_1 = -1/a_1$. A partir dela tem-se $b_0 = V_p + 1/a_1 * IVP_p$;
- determinação do ponto de interseção dessas duas retas (IVP_i, V_i) , sendo $IVP_i = (a_0 - b_0)/(b_1 - a_1)$ e $V_i = (b_1 * a_0 - b_0 * a_1)/(b_1 - a_1)$; e
- determinação da distância entre o ponto de interseção e o ponto que representa o *pixel* de interesse, obtendo:

$$PVI = \sqrt{(IVP_i - IVP_p)^2 + (V_i - V_p)^2} \quad (17)$$

⁶ A determinação da reta do solo para a estimativa dos parâmetros de inclinação e intercepto foi descrita no item 4.3.1, pois envolve o uso de imagens do satélite Landsat 5, necessitando de correção atmosférica e geométrica que também estão descritas naquele item.

Por ser de alto custo computacional e por não distinguir em que lado da reta se posiciona o *pixel*, PERRY Jr. & LAUTENSCHLAGER (1984) propõem a aplicação de técnica de geometria analítica para melhorar a equação acima, ficando o novo índice na forma:

$$PVI_1 = \frac{(a_1 * IVP_p - V_p + a_0)}{\sqrt{a_1^2 + 1}} \quad (18)$$

onde os parâmetros são os mesmos já definidos acima.

BARET & GUYOT (1991) e WIEGAND et al. (1991) inverteram os eixos do diagrama bidimensional, ficando a reta do solo da forma $IVP = a * V + b$ gerando o índice:

$$PVI_2 = \frac{(IVP_p - a * V_p - b)}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (19)$$

QI et al. (1994) propõem: $PVI_3 = b * IVP_p - aV_p$, sendo a o intercepto e b a inclinação desta última reta do solo acima.

HUETE (1988), procurando eliminar a influência do brilho do solo, desenvolveu um índice chamado SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index* - Índice de Vegetação Ajustado para o Solo) baseado tanto na reta do solo quanto no NDVI, chegando à equação abaixo na qual introduz um fator L que é função da cobertura vegetal, ou seja, do Índice de Área Foliar.

$$SAVI = \frac{IVP_p - V}{IVP_p + V_p + L} * (1 + L) \quad (20)$$

O valor de L pode variar de zero ao infinito em função da densidade da vegetação. Para um valor de $L = 0$, o SAVI se iguala ao NDVI e para um valor muito alto, tendendo ao infinito, o SAVI é equivalente ao PVI. Para vegetação com cobertura média, o autor sugere o valor de $L = 0,5$, que vem sendo utilizado em vários trabalhos, inclusive neste. Isso porque, foi testada a utilização de valores de L variando com o Índice de Área Foliar, o que não levou a bons resultados para se obter uma regressão entre o Índice de Vegetação e o Índice de Área Foliar, mesmo porque isso contrariaria a condição de independência das variáveis.

BARET et al. (1989), citados por BARET & GUYOT (1991), sugerem uma alteração para vegetação de baixa densidade, criando o TSAVI₁ (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index* - Índice de Vegetação Ajustado para o Solo Transformado - primeira versão), que foi, posteriormente, melhorado por estes últimos autores, gerando uma segunda transformação, o TSAVI₂.

$$TSAVI_1 = \frac{a * (IVP_p - a * V_p - b)}{V_p + a * IVP_p - a * b} \quad (21)$$

$$TSAVI_2 = \frac{a * (IVP_p - a * V_p - b)}{V_p + a * IVP_p - a * b + 0.08 * (1 + a^2)} \quad (22)$$

onde os parâmetros a e b são os mesmos da reta do solo dos índices PVI₂ e PVI₃.

QI et al. (1994) propõem uma alteração MSAVI₁ (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index* - Índice de Vegetação Ajustado para o Solo Modificado - primeira versão), não propriamente no SAVI, mas no cálculo do seu fator L . Portanto,

$$MSAVI_1 = \frac{IVP_p - V}{IVP_p + V_p + L_1} * (1 + L_1) \quad (23)$$

porém,

$$L_1 = 1 - 2 * a * NDVI * WdVI \quad (24)$$

sendo que a corresponde à inclinação a_1 da reta do solo usada nos índices PVI e PVI₁, com IVP como variável independente, e WdVI está descrito abaixo.

Os mesmos autores propõem uma segunda modificação MSAVI₂ que visa remover ruídos do solo, não removidos pelo produto NDVI*WdVI, e limitar a escala de variação a valores menores que um, sendo esse índice adequado para uso em áreas com alta densidade de vegetação:

$$MSAVI_2 = \frac{2 * IVP_p + 1 - \sqrt{(2IVP_p + 1)^2 - 8 * (IVP_p - V_p)}}{2} \quad (25)$$

CLEVERS (1989) descreve o WDVI (*Weighted Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação por Diferença Ponderada) que foi o último índice calculado aqui e é dado por:

$$WDVI = IVP_p - aV_p \quad (26)$$

sendo que a também corresponde à inclinação α_1 da reta do solo usada nos índices PVI e PVI₁. Segundo EASTMAN (1999), embora simples, esse índice é tão eficiente quanto os demais e minimiza efeito do brilho do solo por meio da multiplicação pela inclinação da reta do solo, que é menor que um.

3.4. Estimativa da Fitomassa através dos Dados Espectrais de Campo

3.4.1. Correlações entre os Índices de Vegetação de Campo e o Índice de Área Foliar

Os Índices de Vegetação foram calculados para os dados individuais de Refletância a partir das fórmulas descritas acima e, posteriormente, foram obtidas médias para cada parcela de cada campanha. Os dados das parcelas 1 e 3 da campanha 7 (17/08/1998) foram excluídos das análises porque a cana-de-açúcar havia florescido, provocando desvios nos valores de Refletância obtidos e, conseqüentemente, nos Índices de Vegetação. De início, esses dados foram incluídos nas análises e se posicionaram fora da tendência normal observada nas outras campanhas. Esse fato é interessante, pois mostra a sensibilidade dos índices utilizados diante das alterações no dossel, confirmando sua eficiência no monitoramento da cultura.

Foram excluídos ainda os dados da parcela 1 da campanha 13 que apresentaram um valor de Índice de Área Foliar muito alto, destoando das outras parcelas na campanha, conforme já discutido no item 2.4.1. Portanto, nas análises de regressão foram utilizados 41 pares de dados, para se obterem as correlações entre os Índices de Vegetação e o Índice de Área Foliar. Utilizou-se, como limite para a aceitação das regressões, o valor mínimo de 0,8062

para o coeficiente de correlação, o que corresponde a um Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,65. Assim, na Tabela 13 são apresentadas as equações apenas para os Índices de Vegetação que apresentaram boas correlações com o Índice de Área Foliar. Cabe ressaltar mais uma vez que, como na Tabela 7, as equações escolhidas representam as regressões com melhores valores de R^2 , porém que tenham um comportamento coerente com o esperado, baseando-se nos dados observados, e que sejam o mais simples possível.

Tabela 13. Equações de regressão entre os Índices de Vegetação (IV) e o Índice de Área Foliar (IAF). Foram selecionados apenas os IVs com Coeficiente de Determinação (R^2) acima de 0,65.

IV	Regressão Escolhida	R^2
Ratio	$IAF = 1,322657E-3 * (Ratio^{(7,00524 - 3,454406 * \log(Ratio))})$	0,6712
NDVI ¹	$IAF = 14,31356 * NDVI^{4,572136}$	0,6773
RVI	$IAF = 15,53271 * EXP(-9,645858 * RVI)$	0,6856
TVI ²	$IAF = 0,6060479 * TVI^{16,62705}$	0,6790
SAVI	$IAF = 365,3941 * SAVI^{4,569753}$	0,6872
TSAVI ₁	$IAF = 255,2679 * EXP(-3,056468 / TSAVI_1)$	0,6773
TSAVI ₂	$IAF = 256,7262 * EXP(-3,043273 / TSAVI_2)$	0,6806
MSAVI ₂	$IAF = 11,77192 * MSAVI_2^{7,05225}$	0,6922
¹ Como NDVI = - NRVI, optou-se por apresentar apenas o NDVI ² Como os resultados para CTVI e TTVI foram sempre idênticos aos do TVI, optou-se por apresentar apenas este último.		

A partir da Tabela 13, percebe-se que nenhum dos Índices de Vegetação apresenta boa correlação com o Índice de Área Foliar, pois não foi possível obter valores de R^2 acima de 70%. Mesmo assim, os índices selecionados são os que apresentam melhor resposta. Os quatro tipos de PVI foram eliminados, pois apresentaram dados muito dispersos, não se enquadrando em nenhum dos modelos de regressão disponíveis no programa AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986).

Por outro lado, pode-se perceber uma leve melhoria, em relação ao NDVI, para os índices que levam em consideração a reta do solo, como o SAVI, o TSAVI₂ e o MSAVI₂,

principalmente este último. Essa observação está de acordo com o destacado por BARET & GUYOT (1991) que detectaram uma maior sensibilidade desses índices, em relação ao NDVI, na eliminação da influência do brilho do solo. Um problema ressaltado por esses autores é a rápida saturação do TSAVI e do NDVI para altos Índices de Área Foliar, ou seja, a falta de sensibilidade na detecção de variações acima de determinado valor do Índice de Área Foliar. MOREIRA (2000) cita saturações, detectadas por alguns autores, para Índices de Área Foliar em torno de 4 ou 5 (m^2 de folhas/ m^2 de terreno). Uma análise gráfica do comportamento dos índices selecionados acima mostra extrema semelhança entre todos eles, que apresentam saturação para valores em torno de 4,5 (m^2 de folhas/ m^2 de terreno), fazendo com que esse seja o limite para sua utilização nas estimativas para previsão do final do ciclo, como já destacado anteriormente no item 2.5.3.

GUTMAN (1991), GOWARD et al. (1991) e MOREIRA (2000), entre vários outros autores, destacam as possíveis causas de erro na estimativa da Refletância e, conseqüentemente, dos Índices de Vegetação, a maioria delas relacionada a dados orbitais. Porém, para os dados de campo, permanecem os erros provocados por visadas fora do nadir, brilho do solo e dos constituintes da liteira. Os dois primeiros foram levados em consideração, tomando-se medidas sempre no nadir e determinando-se a reta do solo para minimizar sua influência. Porém, a composição da liteira é um aspecto importante na cana-de-açúcar, pois, como já destacado ao longo deste Capítulo 3, a palhada deve ter uma influência similar à do solo, como também citado por BARET & GUYOT (1991). Portanto, seria necessário determinar uma “reta da palhada”, analogamente à reta do solo do SAVI e seus derivados, a partir da qual se poderia diferenciar a sua influência sobre a Refletância geral do dossel. Acredita-se que essa seja a principal dificuldade para se obter melhores correlações para a cultura da cana-de-açúcar, como as obtidas para o trigo, por exemplo, por ASRAR et al. (1984).

3.4.2. Estimativa da Produção a partir dos Índices de Vegetação de Campo

Como os Coeficientes de Determinação (R^2) das equações da Tabela 13 não foram muito bons, a intenção de substituir os valores de Índice de Área Foliar nas equações de estimativa da Massa Seca dos Colmos e Total e, posteriormente, na de Massa Seca Proporcional, Equações 4 a 6, foi logo descartada após algumas tentativas, que apresentaram resultados

incoerentes para a Fitomassa estimada. Os modelos de regressão do programa AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986) foram testados para se estimar diretamente a Produção de Massa Seca dos Colmos a partir dos dados de Índices de Vegetação de Campo. Porém, os Coeficientes de Determinação obtidos foram ainda menores que os para o Índice de Área Foliar, ficando, os melhores modelos, em torno de 0,55 e a regressão linear simples, perto de 0,20. Este último valor está de acordo com os obtidos por RUDORFF & BATISTA (1990) para o RVI, também para regressões lineares simples para a Produção final da cultura da cana-de-açúcar no Brasil.

MAAS (1988) e RUDORFF & BATISTA (1990), ao testarem separadamente os modelos exclusivamente agrometeorológicos, ou os de crescimento, e os modelos exclusivamente orbitais, obtiveram resultados piores que para modelos que combinavam esses dois tipos de dados. Diante disso, optou-se por realizar regressões lineares múltiplas utilizando-se os dados de Dias Após o Corte (apresentados na Tabela 2, no item 2.3) e os Índices de Vegetação como variáveis independentes para se estimar a Massa Seca dos Colmos. Na verdade, a variável Dias Após o Corte funciona como fator de ponderação do NDVI e representa os dados meteorológicos transformados em Graus-Dia ou na relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial, mais comumente utilizados em trabalhos de estimativa de Produção. Como a obtenção desses parâmetros exigia a análise de consistência e transformações dos dados meteorológicos, e como os resultados com Dias Após o Corte foram bons (Tabela 14), optou-se por utilizar estes últimos e, num trabalho futuro, analisar as vantagens e desvantagens que a sua substituição traria.

Assim, a Tabela 14 mostra os parâmetros das equações obtidas e seus respectivos Coeficientes de Determinação (R^2). Os modelos ajustados apresentaram valores de R^2 em torno de 0,83 para todos os índices selecionados no item anterior, permitindo uma maior confiabilidade nos resultados de Produção de Massa Seca dos Colmos que possam ser obtidos a partir delas. Por princípio, como sugerido anteriormente, pode-se chegar a valores razoáveis para a estimativa da Produção Final de Massa Seca dos Colmos para determinado ciclo a partir dessas equações, utilizando-se dados obtidos na metade do ciclo e desde que não ocorram fenômenos meteorológicos extremos e raros e as condições meteorológicas fiquem próximas dos valores normais. Esses modelos precisam ser, numa fase seguinte do

trabalho, validados com os dados dos próximos anos para a área de estudo. Restava também testar a utilização dos Índices de Vegetação Orbitais nesse mesmo tipo de estimativa, o que foi feito no Capítulo 4.

Tabela 14. Parâmetros das regressões lineares múltiplas obtidas para a estimativa da Produção de Massa Seca dos Colmos (MSC) a partir dos dados de Índices de Vegetação (IV) e Dias Após o Corte (D). Equações na forma $MSC = IV * a + D * b + c$.

IV	a	b	c	R ²
Ratio	93,7126	16,8510	-1604,94	0,8390
NDVI ¹	523,0838	17,6005	-1488,11	0,8275
RVI	456,4683	17,6740	-1508,14	0,8272
TVI ²	968,2780	17,6277	-2186,60	0,8273
SAVI	999,2944	17,6216	-1470,42	0,8274
TSAVI ₁	1907,9440	17,0239	-2310,70	0,8334
TSAVI ₂	696,5726	17,5641	-1588,15	0,8278
MSAVI ₂	456,4683	17,6740	-1508,14	0,8272

¹ Como NDVI = - NRVI, optou-se por apresentar apenas o NDVI
² Como os resultados para CTVI e TTVI foram sempre idênticos aos do TVI, optou-se por apresentar apenas este último.

3.5. Conclusões Sobre o Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais de Campo

Os dados de Refletância medidos em campo produziram Índices de Vegetação que apresentaram baixa correlação com os dados de Índices de Área Foliar, desaconselhando o uso de valores obtidos por meio das equações apresentadas, principalmente na estimativa da Produção de Massa Seca com as Equações 4 a 6, o que levaria a erros multiplicativos.

Essa baixa correlação apresentada pode estar relacionada à influência da palhada da cana-de-açúcar sobre o comportamento da Refletância do dossel. Discutiu-se que ela pode

ser responsável pelo comportamento anômalo em relação a outras culturas, tanto para a variação do ângulo de incidência solar, quanto para a variação do Índice de Vegetação ao longo do ciclo. Porém, essa hipótese exige medidas mais detalhadas e específicas que as realizadas aqui, utilizando-se dados de uma esfera integradora acoplada ao espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 para que se possam obter conclusões mais fundamentadas.

Os Índices de Vegetação que apresentaram melhores resultados para as relações com o Índice de Área Foliar foram: Ratio, NDVI, RVI, NRVI, TVI, CTVI, TTVI, SAVI, TSAVI₁, TSAVI₂ e MSAVI₂. Esses índices apresentaram o mesmo comportamento e a mesma eficiência e foram selecionados os que apresentaram R² acima de 0,65. Os demais foram descartados, inclusive o PVI e as suas três variações.

Fracassou a tentativa de se obterem regressões para a estimativa da Produção de Massa Seca dos Colmos diretamente a partir dos Índices de Vegetação de Campo selecionados, pois um teste de aplicação das equações provocou erros muito grandes, quando os resultados foram comparados aos valores de Massa Seca de Colmos obtidos em campo. Porém, quando combinados esses valores a dados do ciclo, ou seja, Dias Após o Corte, as regressões foram boas e com Coeficientes de Determinação (R²) em torno de 0,83. Como esta última variável é fácil de se obter e produziu bons resultados, sua utilização é muito conveniente e foi adotada neste trabalho. Embora, na verdade, ela apenas represente outras variáveis meteorológicas como Graus-Dia ou a relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial, mais freqüentemente utilizadas em trabalhos de estimativa de Produção. A utilização de equações combinando Dias Após o Corte e Índices de Vegetação propicia a utilização de imagens de satélites no monitoramento e previsão da Produção Final.

Para estudos futuros, pode-se sugerir ainda a inclusão de outras variáveis como a diferença entre a Temperatura do ar e a Temperatura das folhas do dossel, que pode ser obtida em campo por meio de teletermômetros de radiação ou mesmo por satélites, como apresentado por ALMEIDA (1996 e 2000).

4. Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR

Os objetivos neste capítulo foram os mesmos do Capítulo 3, isto é, monitorar as condições espectrais da área de estudo para estabelecer modelos que correlacionem Índices Espectrais de Vegetação com o Índice de Área Foliar da cultura, ao longo de seu crescimento. Para isso, também aqui foram estimadas as Refletâncias do dossel, porém a partir do tratamento de imagens NOAA14/AVHRR. A partir delas fez-se o cálculo dos Índices de Vegetação Orbitais para se avaliar sua correlação com o Índice de Área Foliar e diretamente com a Massa Seca dos Colmos, da mesma forma que no capítulo anterior.

4.1. Introdução

Devido aos baixos Coeficientes de Determinação obtidos, as análises do Capítulo 3 permitiram concluir que não foi possível calcular, a partir dos dados espectrais, valores de Índices de Área Foliar que pudessem ser introduzidos nas equações 4 a 6 para se estimar a Produção de Massa Seca dos Colmos. Assim, houve a necessidade de se estabelecerem regressões diretamente com a Massa Seca dos Colmos, incluindo o número de Dias Após o Corte, o que melhorou os Coeficientes de Determinação (R^2) das regressões. Esses mesmos passos foram adotados aqui utilizando-se, porém, Índices de Vegetação Orbitais, ou seja, obtidos a partir do processamento de imagens de satélites.

Foram utilizadas as imagens do Satélite NOAA14 (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) que são equipados com o sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). A série de satélites NOAA foi projetada originalmente para o monitoramento oceanográfico e atmosférico, porém, por também possuir bandas nas faixas do Vermelho (banda 1 - 580 a 680nm) e do Infravermelho Próximo (banda 2 - 725 a 1100nm), tem sido utilizada em vários estudos em agricultura e ambiência como, por exemplo, no monitoramento de safras, detecção de incêndios e queimadas, localização de cardumes.

Apesar de sua baixa resolução espacial, quando comparada com a dos satélites projetados para monitoramento de recursos naturais, como os da série Landsat/TM por exemplo, os satélites da série NOAA/AVHRR apresentam alta resolução temporal, sendo que cada um deles obtém, em média, duas imagens por dia. Porém, para evitar grandes distorções, devem ser preferidas as imagens com menor ângulo zenital, o que ocorre aproximadamente a cada dez dias, como destaca GOWARD et al. (1991). Imagens NOAA/AVHRR para a América do Sul são captadas e armazenadas pelo Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da Universidade Estadual de Campinas (Cepagri/Unicamp), onde este trabalho de tese foi desenvolvido.

O objetivo neste capítulo foi estimar a Massa Seca dos Colmos a partir de dados espectrais orbitais do satélite NOAA14/AVHRR. Para isso foram monitoradas as alterações na Refletância Aparente provocadas, principalmente pelas alterações do Índice de Área Foliar da cultura da cana-de-açúcar e influenciadas pela composição da atmosfera, influência essa que foi corrigida para o cálculo da Refletância da superfície. Os valores de níveis de cinza da banda 1 e da banda 2 das imagens NOAA14/AVHRR foram utilizados para calcular, respectivamente, a Refletância no Vermelho e no Infravermelho Próximo, que foram transformadas em Índices de Vegetação para minimizar a variabilidade devida a fatores externos (BARET & GUYOT, 1991), como já discutido no item 3.2.

A partir dos valores de Índice de Vegetação Orbital, aqui também buscou-se ajustar equações que permitissem estimar a Produção da Massa Seca dos Colmos e, aplicando a Equação 4 obtida no item 2.5.2 para Massa Seca dos Colmos Proporcional, estimar a Produção Final. Estimaram-se também regressões diretas entre esses índices e a Massa Seca dos Colmos. A hipótese é que dados orbitais analisados, após as correções geométricas e atmosféricas necessárias, tenham comportamento parecido ao dos dados de campo, apresentados no item anterior, quanto às correlações com o Índice de Área Foliar e com a Produção de Massa Seca de Colmos. Por isso, neste Capítulo 4, foi priorizada a discussão em torno da obtenção dos dados de Refletância Aparente e do seu processamento para a obtenção das correlações desejadas.

4.2. *Processamento das Imagens para a Obtenção da Refletância Orbital*

Ao longo dos três ciclos de coletas de dados e de imagens que pudessem ser correlacionadas com os parâmetros de crescimento da cultura, foram realizadas 14 campanhas (Tabela 2). As datas foram escolhidas com base na disponibilidade de imagens NOAA14/AVHRR, com ângulo de visada o mais próximo possível do nadir e com um ângulo de elevação mínimo de 70º, com apenas duas exceções: 24/11/98 com ângulo de 69,3º e 26/01/99 com 67,7º. Assim, na Tabela 15, são apresentadas as imagens programadas para essas campanhas. Percebe-se que, embora tenham sido incluídas imagens do satélite NOAA15/AVHRR, elas não puderam ser utilizadas nas análises deste item, pois não foi possível adaptar a tempo o algoritmo SCORADIS desenvolvido por ZULLO Jr. (1994), o que foi conseguido apenas para o NOAA14/AVHRR.

Determinou-se que o período entre duas imagens deveria ser grande o suficiente para que houvesse variações no estado da cultura que pudessem provocar diferenças detectáveis entre as duas imagens analisadas. Por outro lado, esse período não poderia ser tão longo que pudesse provocar perda de informações importantes para a análise de crescimento da cultura. Definiu-se o período de dois meses como o ideal entre duas campanhas. Como se percebe na Tabela 15, isso só foi possível no terceiro ciclo. Nessa tabela, além das características das passagens, apresenta-se uma coluna de observações sobre a presença de nuvens e sobre a disponibilidade das imagens e de dados de Radiação Direta, necessários para a correção atmosférica. As passagens selecionadas para a análise realizada estão apresentadas em negrito.

Das 29 passagens dos satélites concomitantes às campanhas listadas na Tabela 2, somente as imagens dos dias 3 e 4 de outubro de 1997 não puderam ser recuperadas do banco de imagens do CEPAGRI, pois houve problemas com a estação de recepção no momento de seu armazenamento. Todas as demais foram recuperadas e recortadas de maneira a diminuir o tamanho das imagens e o tempo de processamento. Mantiveram-se, porém, amplas o suficiente para conter pontos no Estado de São Paulo que pudessem ser adotados como marcas terrestres identificáveis nas imagens, como as represas de Promissão, Marimondo e Jurumirim e rios de grande porte, por exemplo.

Tabela 15. Especificações das passagens dos satélites NOAA, selecionadas para as campanhas realizadas no projeto. São apresentadas observações sobre o motivo para cada imagem ter sido descartada na análise e, para as selecionadas (apresentadas em **negrito**), o aparelho utilizado na medida da Radiação (Rad.) Direta.

Campanha	Passagem	Satélite	Data	Hora GMT	Ângulo (°)	Observação
01	01	NOAA-14	30/10/96	17h28	76,9	Rad. Direta pelo LI-1800
	02	NOAA-14	31/10/96	17h16	81,9	Presença de Nuvens
02	03	NOAA-14	15/12/96	17h29	79,2	Presença de Nuvens
	04	NOAA-14	16/12/96	17h17	79,6	Rad. Direta pelo LI-1800
03	05	NOAA-14	13/04/97	17h36	78,5	Sem Dados de Rad. Direta
	06	NOAA-14	14/04/97	17h25	80,3	Rad. Direta pelo LI-1800
04	07	NOAA-14	19/08/97	17h42	82,9	Rad. Direta pelo LI-1800
05	08	NOAA-14	03/10/97	17h51	71,6	Imagem Indisponível
	09	NOAA-14	04/10/97	17h40	87,0	Imagem Indisponível
06	10	NOAA-14	23/06/98	18h10	77,3	Sem Dados de Rad. Direta
	11	NOAA-14	24/06/98	17h59	81,1	Presença de Nuvens
07	12	NOAA-14	17/08/98	18h05	82,5	Rad. Direta pelo LI-1800
08	13	NOAA-15	04/11/98	10h15	73,1	Presença de Nuvens
	14	NOAA-14	05/11/98	18h22	78,7	Rad. Direta pelo LI-1800
09	15	NOAA-14	24/11/98	18h12	69,3	Sem Dados de Rad. Direta
10	16	NOAA-15	25/01/99	10h07	60,0	Rad. Direta pelo LI-1800
	17	NOAA-14	25/01/99	18h24	88,6	Sem Dados de Rad. Direta
	18	NOAA-14	26/01/99	18h12	67,7	Presença de Nuvens
11	19	NOAA-15	28/03/99	10h40	60,2	Rad. Direta pelo CIMEL-317
	20	NOAA-14	28/03/99	18h34	83,8	Sem Dados de Rad. Direta
	21	NOAA-15	29/03/99	10h18	77,4	Rad. Direta pelo CIMEL-317
	22	NOAA-14	29/03/99	18h23	74,3	Presença de Nuvens
12	23	NOAA-15	26/05/99	10h36	66,3	Presença de Nuvens
	24	NOAA-15	27/05/99	10h14	70,9	Presença de Nuvens
13	25	NOAA-15	11/07/99	10h19	79,5	Presença de Nuvens
	26	NOAA-14	12/07/99	18h49	77,5	Presença de Ruídos
14	27	NOAA-15	25/08/99	10h23	86,7	Rad. Direta pelo CIMEL-317
	28	NOAA-14	25/08/99	18h56	74,4	Rad. Direta pelo CIMEL-317
	29	NOAA-14	26/08/99	18h45	83,7	Rad. Direta pelo CIMEL-317

Os valores armazenados nessas imagens orbitais foram processados para se realizar correções de desvios provocados tanto por influência da atmosfera, quanto por influência de desvio de posicionamento. Essas correções são conhecidas como “correção atmosférica” e “correção geométrica” ou “georreferenciamento”, respectivamente.

O georreferenciamento, na maioria dos programas de processamento de imagens, altera os valores dos níveis de cinza das imagens, prejudicando a correção atmosférica e, portanto, a aplicação final dos dados. Assim, o mais recomendado é que se faça a correção atmosférica antes da geométrica. Porém, principalmente em satélites de baixa resolução espacial como é o caso do NOAA/AVHRR, o inconveniente é a dificuldade de determinação do *pixel* monitorado em campo antes do georreferenciamento.

Frente a esse problema, o algoritmo de correção geométrica do programa METPRO, específico para o processamento de imagens e geração de produtos gráficos voltados à meteorologia (GSC,1994), foi testado para se verificar seu comportamento e determinar qual análise deveria ser realizada primeiro. Tanto a descrição do manual do programa, quanto os testes realizados com algumas imagens de campo, mostraram que o algoritmo utilizado não provoca alteração no valor do nível de cinza, mas sim no arquivo de documentação, ou registro, das imagens, alterando somente o cálculo das coordenadas de posicionamento. Essa verificação permitiu optar por realizar primeiro a correção geométrica e, posteriormente, a atmosférica. Somente após a correção atmosférica é que se puderam selecionar as imagens sem a influência de nuvens ou ruídos, e que possuísem medidas simultâneas de Radiação Direta que pudessem ser usadas na correção atmosférica para se calcular a Refletância Aparente de cada campanha. Essas imagens estão destacadas na Tabela 15. As correções foram realizadas da maneira descrita a seguir.

4.2.1. Correção Geométrica das Imagens

Fatores como a baixa altitude na tomada das imagens, grandes ângulos de varredura e a movimentação do satélite em relação à Terra levam a distorções na imagem que dificultam a identificação das coordenadas geográficas terrestres nela representadas, provocando o chamado “efeito geométrico” (SEGARRA, 1991). Essas distorções podem ser eliminadas através do uso de processos de correção geométrica ou georreferenciamento. Os métodos consistem em corrigir as coordenadas da imagem baseando-se num modelo de geometria orbital ou de pontos de controle no terreno.

Apesar do programa METPRO (GSC, 1994), utilizado para o processamento das imagens, fazer previamente a correção da imagem baseado em cálculos de geometria orbital a partir de informações fornecidas no cabeçalho das imagens NOAA14/AVHRR, os resultados nem sempre são satisfatórios para se localizar o *pixel* correspondente à área de estudo. Por isso, adotou-se a segunda opção, pois, independe da obtenção de informações orbitais precisas, baseando-se apenas em informações geográficas de boa qualidade que podem ser obtidas em cartas oficiais. Os resultados dessa correção são bastante superiores e permitem a localização correta do *pixel* de interesse.

Esse trabalho de localização e verificação da correção geométrica foi realizado com grande precisão, pois além do perfeito posicionamento dos pontos de controle, após se determinar o *pixel* que correspondia à área de estudo, podia-se conferir a cerca dois *pixels* daquele ponto, a presença do rio Moji Guaçu, que passa a aproximadamente de 2km dali e possui dimensões suficientes para provocar o aparecimento de uma estreita faixa mais escura na imagem.

As imagens do satélite NOAA14/AVHRR, referentes às campanhas realizadas, foram georreferenciadas usando uma sub-rotina disponível no METPRO. Esse programa faz a correção geométrica baseando-se nas posições de marcas terrestres visíveis na imagem e definidas pelo usuário. Dessa forma, o ajuste do polinômio usado para a correção é feito pelo método dos quadrados mínimos para *pixels* da imagem na posição (X, Y) em relação às coordenadas geográficas corretas das marcas terrestres, fornecidas pelo usuário. À medida que essas coordenadas são registradas, o programa cria um arquivo de marcas terrestres que são utilizadas na operação de ajuste (GSC, 1994).

As imagens captadas pela banda 2 (Vermelho) de cada passagem NOAA14/AVHRR, referentes às campanhas realizadas, foram analisadas individualmente para se determinar o maior número de marcas terrestres visíveis, que pudessem servir de pontos de controle, escolhidos a partir dos apresentados na Figura 21. As coordenadas geográficas dessas marcas foram identificadas em cartas topográficas elaboradas nas escalas 1:50.000 e 1:250.000, editadas pela Superintendência de Cartografia do IBGE nos anos de 1971 e 1979, respectivamente. A Figura 21, além de apresentar os pontos de referência citados, mostra

também a relação de cartas utilizadas. A numeração dos pontos possui valores descontínuos na Tabela 16, pois foram apresentados apenas os pontos utilizados na correção geométrica das imagens, retirados de um banco maior de coordenadas geográficas de pontos no Estado de São Paulo, normalmente visíveis em imagens de satélite.

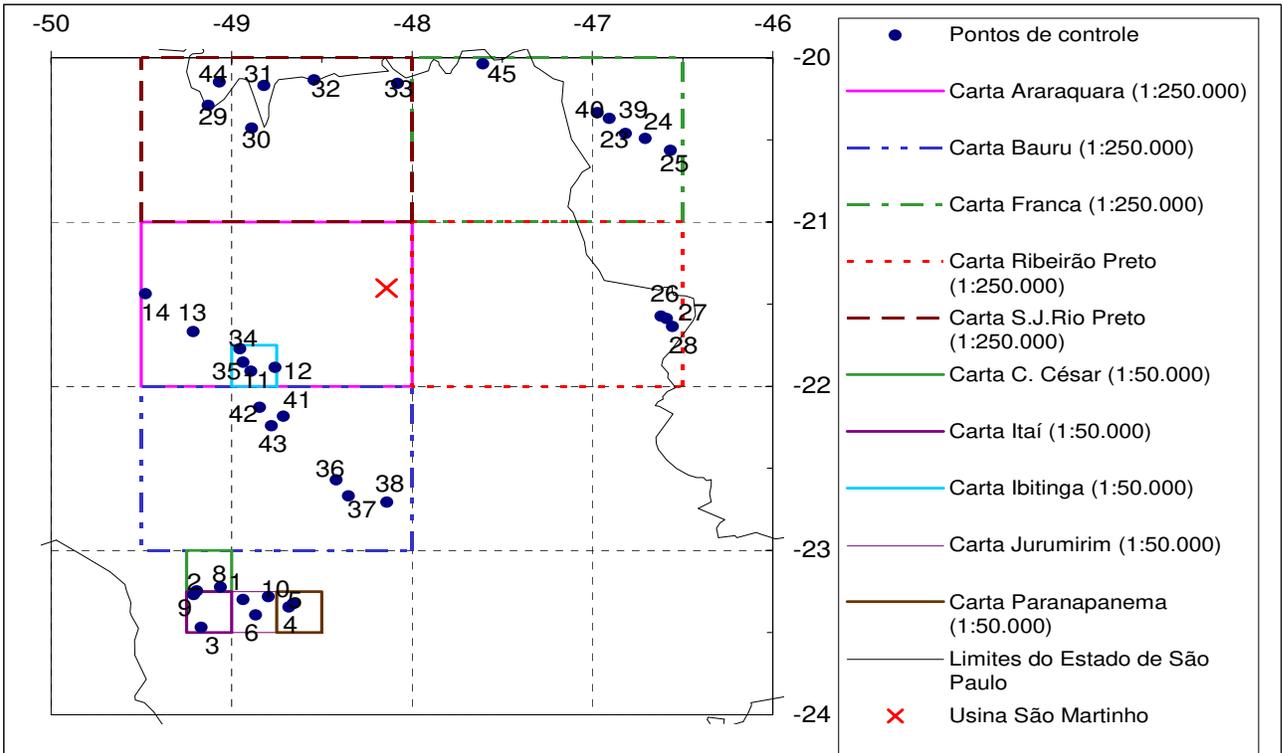


Figura 21. Localização espacial da usina São Martinho, dos pontos de controle e das cartas IBGE usados no georreferenciamento. As coordenadas geográficas (Latitude/Longitude em $^{\circ}$) dos pontos de controle estão especificadas na Tabela 16.

Tabela 16. Latitude e Longitude dos pontos utilizados no georreferenciamento das imagens NOAA/AVHRR. Identificadores (ID) de acordo com a Figura 21. (USM = Usina São Martinho)

ID	Longitude			Latitude			Longitude (graus decimais)	Latitude (graus decimais)
	°	'	"	°	'	"		
1	-48	56	12.0000	-23	17	52.0000	-48.93666667	-23.29777778
2	-49	11	30.0000	-23	14	48.0000	-49.19166667	-23.24666667
3	-49	10	8.0000	-23	28	5.0000	-49.16888889	-23.46805556
4	-48	40	54.0000	-23	20	38.0000	-48.68166667	-23.34388889
5	-48	39	27.0000	-23	19	23.0000	-48.65750000	-23.32305556
6	-48	51	54.0000	-23	23	36.0000	-48.86500000	-23.39333333
8	-49	3	35.0000	-23	13	24.0000	-49.05972222	-23.22333333
9	-49	12	32.0000	-23	16	7.0000	-49.20888889	-23.26861111
10	-48	47	45.0000	-23	16	57.0000	-48.79583333	-23.28250000
11	-48	53	29.0000	-21	54	34.0000	-48.89138889	-21.90944444
12	-48	45	30.0000	-21	53	12.0000	-48.75833333	-21.88666667
13	-49	12	46.0000	-21	40	3.0000	-49.21277778	-21.66750000
14	-49	28	34.0000	-21	26	20.0000	-49.47611111	-21.43888889
23	-46	49	1.4634	-20	27	48.2927	-46.81707317	-20.46341463
24	-46	42	24.0000	-20	29	32.0000	-46.70666667	-20.49222222
25	-46	34	3.0000	-20	33	54.0000	-46.56750000	-20.56500000
26	-46	37	8.5714	-21	34	24.3567	-46.61904762	-21.57343242
27	-46	35	17.1429	-21	35	18.2432	-46.58809524	-21.58840090
28	-46	33	21.4286	-21	38	16.2162	-46.55595238	-21.63783784
29	-49	7	45.0718	-20	17	26.4115	-49.12918660	-20.29066986
30	-48	53	14.0499	-20	25	41.1071	-48.88723608	-20.42808530
31	-48	49	14.0670	-20	10	8.0383	-48.82057416	-20.16889952
32	-48	32	30.7177	-20	8	10.9091	-48.54186603	-20.13636364
33	-48	4	44.2105	-20	9	22.3924	-48.07894737	-20.15622010
34	-48	57	12.0652	-21	46	19.0761	-48.95335145	-21.77196558
35	-48	56	6.8478	-21	51	13.3696	-48.93523551	-21.85371377
36	-48	25	12.1622	-22	34	16.2162	-48.42004505	-22.57117117
37	-48	21	4.0541	-22	40	4.0540	-48.35112613	-22.66779279
38	-48	8	24.3243	-22	42	20.2703	-48.14009009	-22.70563063
39	-46	54	22.5000	-20	22	11.2839	-46.90625000	-20.36980108
40	-46	58	22.9580	-20	20	9.2224	-46.97304389	-20.33589512
41	-48	42	48.5294	-22	10	56.0000	-48.71348039	-22.18222222
42	-48	50	42.3529	-22	7	44.0000	-48.84509804	-22.12888889
43	-48	46	44.1176	-22	14	32.0000	-48.77892157	-22.24222222
44	-49	4	0.4580	-20	8	53.5135	-49.06679389	-20.14819820
45	-47	36	27.0000	-20	2	16.0000	-47.60750000	-20.03777778
USM	-48	8	26.476	-21	24	6.994	-48.14068778	-21.40194278

Dos pontos listados na Tabela 16, a maioria foi tomada nas Represas de Promissão, Marimondo e Jurumirim que, devido às suas grandes extensões, tornam os *pixels* referentes a seus pontos mais facilmente identificáveis em imagens NOAA, considerando que a sua resolução espacial máxima é de 1,1 x 1,1km. Os resultados desse trabalho de processamento permitiram definir quais imagens das listadas na Tabela 15 eram realmente apropriadas para o cálculo dos valores de Refletância para a obtenção dos Índices de Vegetação Orbitais, a partir dos valores já corrigidos quanto aos efeitos atmosféricos.

4.2.2. Correção Atmosférica das Imagens

GOWARD et al. (1991) analisaram as várias causas de erros ou imprecisões que podem ocorrer nos dados obtidos a partir das imagens NOAA/AVHRR. A primeira delas, como já comentado no item anterior, é a necessidade de se trabalhar com dados de Refletância, ao invés de níveis de cinza ou radiância, para que seja possível comparar dados entre vários sensores como, por exemplo, os dados NOAA14/AVHRR e os do radiômetro CIMEL-313/22. Segundo GALVÃO et al. (1999), as diferenças de posicionamento entre as bandas dos diferentes sensores, de maneira geral, não influenciam significativamente os valores de Refletância obtidos. Porém, para os satélites NOAA/AVHRR, que têm sua banda no Infravermelho Próximo iniciando abaixo dos 750nm, há a tendência de produzir imagens de NDVI com um conteúdo menor de informações em relação a outros sensores, principalmente na ocorrência de vegetação seca. Outro fator, apresentado por GOWARD et al. (1991), são as mudanças de calibração do sensor ao longo do tempo, que são difíceis de calcular e os autores não apresentaram uma alternativa concreta para a sua correção.

Os autores citam ainda o problema de tomadas de medidas fora do nadir e recomendam que, para medidas quantitativas de Índices de Vegetação, não se utilizem imagens com ângulo zenital maior do que 30°, o que corresponde a um ângulo de elevação de 60°. Como já citado, justamente para evitar as distorções decorrentes, adotou-se como limite um ângulo de elevação do satélite em torno de 70°, como apresentado na Tabela 15. Isso, porém, faz com que a resolução temporal diminua para nove ou dez dias. Associado a isso, ainda deve-

se descartar os dias nublados, reduzindo ainda mais a resolução temporal, o que pode ser contornado, em alguns casos, por composições de algumas imagens.

TANRÉ et al. (1990), GOWARD et al. (1991) e ZULLO Jr. (1994) citam como um dos fatores mais importantes de erro em valores obtido a partir de imagens orbitais, a atenuação atmosférica da Radiação Refletida pela vegetação, causando grandes diferenças entre a Refletância Aparente, medida pelo sensor do satélite, e a Refletância Real da superfície.

Segundo ZULLO Jr. (1994), os principais efeitos observados nas imagens, devidos à presença real da atmosfera entre o satélite e a superfície terrestre, são a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem. Os gases (principalmente vapor d'água, oxigênio, ozônio e dióxido de carbono) e os aerossóis (pequenas partículas materiais, distintas da água e do gelo, em suspensão e com raio variando de 0,1 μ m a 10 μ m) absorvem e espalham a radiação solar desde quando ela atinge a atmosfera até quando a deixa, depois de refletida pelo solo.

As dificuldades para se obterem os dados necessários e a complexidade dos cálculos envolvidos fazem com que a correção atmosférica seja quase sempre desconsiderada ou, então, se baseie em métodos simplificados que chegam a produzir erros de estimativa da Refletância terrestre superiores aos obtidos com as imagens originais (MORAN et al. 1991; ZULLO Jr., 1994). Porém, já existem programas computacionais desenvolvidos especificamente para a remoção dos efeitos atmosféricos nas imagens de satélite, como o SCORADIS, apresentado por ZULLO Jr. (1994). Esse sistema tem como base o modelo de transferência radiativa 5S (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) (TANRÉ et al., 1990) e foi desenvolvido a partir de trabalhos experimentais realizados nas condições brasileiras de atmosfera, clima e disponibilidade de dados.

A avaliação da influência da atmosfera em processamentos básicos feitos nas imagens de satélite, como os índices de vegetação por exemplo, pode ser encontrada em ZULLO Jr. (1994) e ZULLO Jr. et al. (1994b). Nesse caso, a presença da atmosfera faz com que o NDVI seja subestimado numa ordem de grandeza de 0,2, levando a erros de estimativa da

Fitomassa superiores a 100%. A classificação automática de padrões em imagens sem correção atmosférica é dificultada quando comparada com imagens corrigidas. Fez-se um teste com os dados brutos das imagens, aplicando exatamente as mesmas análises do item 4.3 e não foi possível obter boas correlações entre os Índices de Vegetação e o Índice de Área Foliar ou a Massa Seca dos Colmos. Porém, após a correção atmosférica, vários Índices de Vegetação puderam ser correlacionados aos valores obtidos a partir das imagens corrigidas, confirmando a sua eficiência na correção das alterações provocadas pela atmosfera.

O algoritmo de correção SCORADIS, desenvolvido por ZULLO Jr. (1994) para o satélite Landsat/TM, foi adaptado pelo autor para uso em imagens NOAA14/AVHRR (ZULLO Jr., 2000). Esse algoritmo baseia-se no modelo 5S e exige, como dados de entrada, a localização geográfica, data, hora, tipo e quantidade de aerossóis presentes e o modelo atmosférico dos componentes gasosos, principalmente vapor d'água e ozônio, que são calculados com base na Pressão Atmosférica, Temperatura e Radiação Direta Incidente. Esse modelo leva em consideração a influência atmosférica, por meio do espalhamento e absorção, sobre a Radiação que chega aos sensores do satélite. Com base nesses dados, o modelo 5S faz a correção do nível de cinza da imagem e o cálculo da Refletância corrigida.

Os passos para se obter o valor da Refletância corrigida são os seguintes:

- a data e a hora corretas da passagem são calculadas pelo sistema de recepção de imagens NOAA/AVHRR existente no Cepagri/Unicamp;
- com os dados de Radiação Direta (obtidos conforme descrito no item seguinte) e baseado no trabalho de ZULLO Jr. et al., (1996) calcula-se o Conteúdo de Vapor d'Água da atmosfera;
- adota-se a Concentração de Ozônio dada por LONDON et al. (1976) para a latitude e mês correspondente da aquisição da imagem;
- utilizam-se os dados acima no programa SCORADIS para o cálculo da Transmitância Global, para aerossol continental e superfície vegetal homogênea;

- pelo método descrito por ZULLO Jr. (1994) calcula-se o Ângulo Horário, a Declinação e Ângulo Zenital do Sol para se estimar a Massa Ótica atravessada pela Radiação;
- utiliza-se a Transmitância Global, a Massa Ótica e o Fator de Correção da Constante Solar, além dos dados de Energia Refletida medidos em campo com o radiômetro, para se determinar Espessura Ótica daquele dia, por meio de regressão linear;
- com todos os dados acima, utiliza-se o programa SCORADIS, adaptado por ZULLO Jr. (2000) para imagens do satélite NOAA14/AVHRR, para processar os recortes de imagens contendo o *pixel* correspondente à área de estudo e calcular a Refletância Real da superfície.

Os dados obtidos para Refletância estão na forma de recortes de imagens de onze por onze *pixels*, onde o *pixel* central representa a área de estudo. Como o objetivo final é a análise das correlações dos Índices de Vegetação, optou-se por não apresentar o conjunto de imagens porque enriqueceria pouco as análises.

4.2.2.1. Medida da Radiação Direta

A Radiação Solar direta, que é importante na correção atmosférica das imagens, foi medida de duas formas. A primeira, utilizada nas campanhas 1 a 10, foi feita com o próprio espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 com um sensor co-seno que dispensa o cabo de fibra ótica, como ilustrado na Figura 14 (aparelho B). Nesse método, fez-se uma medida da Radiação Global Incidente e, posteriormente, uma medida da Radiação Difusa impedindo-se a incidência da Radiação Solar Direta sobre o sensor. Obteve-se a Radiação Direta por diferença entre essas duas medidas.

A segunda forma de obtenção da Radiação Solar Direta utilizou o radiômetro solar CIMEL-317, aparelho específico para esse tipo de medida, que é feita mirando-se um tubo negro em direção ao Sol, o que evita a entrada da Radiação Difusa. Esse método é mais adequado que o método anterior e foi utilizado nas campanhas 11 a 14.

Para os dois métodos foi necessário determinar um fator de calibração do aparelho conforme o método da Curva de Langley descrito por ZULLO Jr. (1994). Esse fator de calibração foi utilizado na regressão linear para a estimativa da Espessura Ótica, de acordo com os passos descritos acima.

4.3. Estimativa da Fitomassa por meio dos Dados Espectrais Orbitais

4.3.1. Determinação da Reta do Solo

Antes de se iniciar propriamente a análise dos Índices de Vegetação orbitais, é necessário descrever o método para se estimar a reta do solo, utilizada para calcular alguns dos Índices de Vegetação apresentados no item 3.3 e utilizados também aqui para o cálculo de valores orbitais a partir das imagens NOAA14/AVHRR. Uma imagem Landsat/TM do dia 28/09/1997 foi processada e também teve que ser submetida à correção atmosférica e ao cálculo da Refletância Real. Porém, como não se dispunha de medidas da Radiação Direta para a região, pois não se sabia quando se teria uma imagem boa, os valores necessários foram estimados por outros métodos.

O Conteúdo de Vapor d'Água na atmosfera foi estimado a partir dos dados de Pressão, Temperatura e Umidade Relativa da superfície, utilizando-se o modelo atmosférico tropical, apresentado por TANRÉ et al. (1986). Esse método, descrito por ZULLO Jr. (1994), foi previamente testado em um dia para o qual se dispunha de valores de Radiação Direta, produzindo resultado sem diferença estatística em relação ao estimado pelo outro método. Para a Espessura Ótica, a comparação detalhada desse dia (28/09/97) com a situação da atmosfera em um dia na mesma época seca do ano posterior (17/08/98), para o qual se dispunha de dados de Radiação Direta e de um histórico de chuvas quase idêntico, permitiu concluir que seria possível utilizar os dados de Espessura Ótica deste último dia com boa precisão (ZULLO Jr., 2000).

Assim, pôde-se estimar a Refletância da banda 3 (Vermelho - 630 a 690nm) e da banda 4 (Infravermelho Próximo - 760 a 900nm) para um recorte da imagem Landsat/TM interno à área de estudo com o solo ainda nu. Com os pares de valores das duas bandas de todos os

pixels, representando a variação do solo no espaço bidimensional Vermelho/Infravermelho Próximo, determinou-se a reta do solo para os dados orbitais por meio de regressão linear simples. Como alguns dos Índices de Vegetação utilizam os eixos invertidos, foi necessário estimar duas retas diferentes.

4.3.2. Correlações entre os Índices de Vegetação Orbitais e o Índice de Área Foliar

Os Índices de Vegetação Orbitais foram calculados com o auxílio do pacote computacional Idrisi32 (EASTMAN, 1999) por meio do processamento das imagens de Refletância geradas a partir o programa SCORADIS (ZULLO Jr., 1994) e seguindo a formulação apresentada no item 3.3. As bandas do satélite NOAA14/AVHRR, para as quais essas imagens foram geradas, foram a banda 1 e 2 (Vermelho - 580 a 680 nm e Infravermelho Próximo - 725 a 1100 nm, respectivamente).

As imagens sem nuvens e sem ruídos e que possuíam dados de Radiação Direta sem falhas ou inconsistências foram selecionadas para esta análise de Índices de Vegetação Orbitais. Com base na Tabela 15, as passagens selecionadas, apresentadas em negrito, foram as dos dias: 30/10 e 16/12/1996, 14/04 e 19/08/1997, 17/08 e 05/11/1998, 25 e 26/08/1999. Assim como para a análise de crescimento e para a dos Índices de Vegetação calculados a partir das medidas de campo, os dados do dia 17/08/1998 foram excluídos das análises porque a cana-de-açúcar havia florescido, provocando desvios nos valores de Refletância obtidos e, conseqüentemente, nos Índices de Vegetação. Novamente, esses dados do dia 17/08/1998 foram incluídos nas primeiras análises, posicionando-se fora da tendência normal observada nas outras campanhas, e posteriormente foram desprezados, melhorando as correlações. Esse fato é interessante, pois mostra a sensibilidade dos Índices Orbitais diante das alterações no dossel, confirmando sua eficiência no monitoramento da cultura, como ocorreu também para os dados de campo. Isso, por si só, já mostra uma grande coerência entre os dados espectrais obtidos em campo e os orbitais, representando uma situação que já havia sido detectada pelas medidas agrônômicas de campo.

As análises de regressão foram feitas baseando-se, portanto, em sete imagens para se obter as correlações entre os Índices de Vegetação Orbitais e o Índice de Área Foliar. Utilizou-se, como limite para a aceitação das regressões, o mesmo valor mínimo de 0,8062 para o Coeficiente de Correlação utilizado no item 3.4, o que corresponde a um Coeficiente de Determinação (R^2) de 0,65. Assim, na Tabela 17, são apresentadas as equações apenas para os Índices de Vegetação selecionados. Cabe ressaltar mais uma vez que, como na Tabela 7 e na Tabela 13, as equações escolhidas representam as regressões com melhores valores de R^2 , mas que tenham um comportamento coerente com o esperado, baseando-se nos dados observados, e que sejam o mais simples possível.

Tabela 17. Equações de regressão entre os Índices de Vegetação Orbitais (IVOs) e o Índice de Área Foliar (IAF). Foram selecionados apenas os IVOs com Coeficiente de Determinação (R^2) acima de 0,65.

IVO	Regressão Escolhida	R^2
Ratio	$IAF = 4,4 / (1 + (\text{Ratio} / 2,681478)^{-2,89122})$	0,7123
NDVI ¹	$IAF = 10,20869 * \text{EXP} (-0,7232938 / \text{NDVI})$	0,7123
TVI ²	$IAF = 4,4 / (1 + 1,76611\text{E}8 * \text{EXP} (-19,59141 * \text{TVI}))$	0,7140
PVI ₃	$IAF = 3,254301 * \text{EXP} (0,2318056 * \text{PVI}_3)$	0,7797
SAVI	$IAF = 10,41697 * \text{EXP} (-1,080609 / \text{SAVI})$	0,7090
TSAVI ₁	$IAF = 4,4 / (1 + (\text{TSAVI}_1 / 0,2077855)^{-4,11254})$	0,7123
TSAVI ₂	$IAF = 4,4 / (1 + (\text{TSAVI}_2 / 0,2060586)^{-4,161333})$	0,7106
MSAVI ₂	$IAF = 20,62055 * \text{EXP} (-1,421623 / \text{MSAVI}_2)$	0,7090
¹ Como NDVI = - NRVI, optou-se por apresentar apenas o NDVI ² Como os resultados para CTVI e TTVI foram sempre idênticos aos do TVI, optou-se por apresentar apenas este último.		

A partir da Tabela 17, percebe-se que nenhum dos Índices de Vegetação apresenta valores de R^2 muito acima de 70%. Mesmo assim, os índices selecionados parecem ser os menos sujeitos aos fatores externos, que prejudicam a relação com o Índice de Área Foliar. Dentre os PVIs, apenas o PVI₃ apresentou bom Coeficiente, o melhor de todos. Porém, dentre as várias opções oferecidas pelo pacote computacional AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986), apenas esse modelo apresentado teve Coeficiente de Determinação acima de 0,65, o que

não ocorreu para os outros índices, para os quais sempre havia vários tipos modelos com coeficientes similares.

Percebe-se que os Coeficientes de Determinação (R^2) dessas regressões são significativamente maiores que os dos dados de campo, porém, deve-se ressaltar que eles são baseados numa amostragem seis vezes menor, ou seja, enquanto as regressões para os dados de campo foram baseadas em 41 pares de dados, as dos dados orbitais foram baseadas em sete pares, possuindo, portanto, uma menor representatividade, expressa pelo nível de significância, que foi baixíssimo para as primeiras e de 2% para as segundas. Assim como discutido no item 3.4.1, acredita-se que a influência da palhada seja a principal dificuldade para se obter melhores correlações para a cultura da cana-de-açúcar.

4.3.3. Estimativa da Produção a partir dos Índices de Vegetação Orbitais

Foram realizados testes de substituição dos valores de Índices de Área Foliar estimados a partir dos Índices de Vegetação Orbitais nas equações 4 a 6. Porém, devido aos baixos Coeficientes de Determinação (R^2) das equações da Tabela 17, os resultados obtidos desviaram-se do real. Portanto, procurou-se adotar o mesmo tipo de equação da Tabela 14 do item 3.4.2, incluindo o número de Dias Após o Corte na estimativa direta da Massa Seca dos Colmos, além do Índice de Vegetação Orbital.

As equações obtidas estão representadas na Tabela 18 que mostra os parâmetros das equações obtidas e seus respectivos Coeficientes de Determinação (R^2). Os modelos ajustados apresentaram valores de R^2 em torno de 0,95 para todos os índices selecionados no item anterior, permitindo uma maior confiabilidade nos resultados de Produção de Massa Seca dos Colmos que possam ser obtidos a partir delas. Como sugerido anteriormente, pode-se estimar a Produção Final de Massa Seca dos Colmos para determinado ciclo a partir dessas equações, utilizando dados obtidos na metade do ciclo e desde que não ocorram fenômenos meteorológicos mais severos, como secas prolongadas, por exemplo.

Porém, um forte indício de que eles estão coerentes é o fato de que os dados orbitais, apresentados neste item, tiveram o mesmo comportamento e as mesmas respostas que os

dados de campo. Só existe três campanhas comuns entre eles, o que não permite embasar quantitativamente uma análise de correlação. Apesar disso, os Índices de Vegetação que apresentaram boa correlação são os mesmos e os modelos apresentados pelo programa AJUSTE (ZULLO Jr. & ARRUDA, 1986) também são os mesmos. Ainda, esses modelos apresentam valores próximos para os R^2 das regressões obtidas, mesmo após terem sido processados independentemente e por métodos diferentes. Essas evidências, praticamente, atestam essa boa relação.

Tabela 18. Parâmetros das regressões lineares múltiplas obtidas para a estimativa da Produção de Massa Seca dos Colmos (MSC) a partir dos dados de Índices de Vegetação Orbitais (IVO) e Dias Após o Corte (D). Equações na forma $MSC = IVO * a + D * b + c$.

IVO	a	b	c	R^2
Ratio	-34,9379	17,1255	-985,65	0,9581
NDVI ¹	-325,3940	17,1384	-963,69	0,9567
TVI ²	-561,0710	17,1365	-568,81	0,9565
PVI3	-29,1379	17,2471	-1207,91	0,9569
SAVI	-233,7870	17,1394	-954,19	0,9567
TSAVI1	-733,4090	17,1324	-933,98	0,9576
TSAVI2	-753,0970	17,1307	-930,84	0,9576
MSAVI2	-323,1940	17,1389	-919,14	0,9565

¹ Como NDVI = - NRVI, optou-se por apresentar apenas o NDVI
² Como os resultados para CTVI e TTVI foram sempre idênticos aos do TVI, optou-se por apresentar apenas este último.

4.4. Conclusões sobre o Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR

A principal hipótese que se queria testar era a de que o comportamento dos dados orbitais está coerente, ou bem correlacionado, com os dados de campo. Na realidade, como discutido, existe um indício de que isso esteja correto, visto que os dados orbitais tiveram o

mesmo comportamento e as mesmas respostas que os dados de campo. Infelizmente, após a seleção de imagens orbitais de boa qualidade para as análises, não foi possível testar a correlação direta entre eles, pois o número final de campanhas comuns era de apenas três. Porém, o comportamento muito semelhante dos dois tipos de dados, após terem sido processados independentemente e por métodos diferentes, praticamente atesta essa boa relação.

Os Índices de Vegetação Orbitais que apresentaram melhores resultados para as relações com o Índice de Área Foliar foram praticamente os mesmos que os do item 3.4.1: Ratio, NDVI, PVI₃, NRVI, TVI, CTVI, TTVI, SAVI, TSAVI₁, TSAVI₂ e MSAVI₂. Esses índices apresentaram o mesmo comportamento e a mesma eficiência e os que foram selecionados apresentaram R² em torno de 0,71, um pouco mais alto que o dos dados de campo, porém com menor significância estatística. A única nova inclusão foi o PVI₃. Os demais foram descartados.

Da mesma forma que para os dados de campo, os modelos que utilizam o número de Dias Após o Corte, juntamente aos Índices de Vegetação Orbitais selecionados, também apresentaram uma melhoria significativa. Os valores de R² passaram para 0,95 quando incluída essa variável, que é de fácil obtenção e que não demanda processamentos ou transformações, sendo muito útil no monitoramento por satélite.

Um detalhe importante destacado também aqui é o comportamento anômalo do dia 17 de agosto de 1998, que à primeira vista deveria ser encarado como uma perda de informações. Porém, esse comportamento diferenciado permitiu verificar a sensibilidade dos métodos utilizados nos Capítulos 2, 3 e também no Capítulo 4.

5. Conclusões

Neste capítulo se procurou reproduzir as principais conclusões obtidas ao longo do trabalho e apresentar uma conclusão sobre sua hipótese geral. Para isso, foram transcritas as conclusões individuais dos capítulos anteriores e, com base nelas, apresentadas as conclusões gerais do trabalho. Por fim, foram apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros, geradas a partir deste trabalho de tese.

5.1. Conclusões sobre a Análise de Crescimento da Cana-de-Açúcar

As curvas de forma sigmoidal são as que mais se ajustam ao padrão de crescimento da cana-de-açúcar, permitindo uma interpretação com sentido biológico. Dentre elas, as que representaram melhor o comportamento dos dados obtidos em campo foram:

- Gompertz para a Massa Seca Total e dos Colmos; e
- Cúbica para a Massa Seca das Folhas e para o Índice de Área Foliar.

O modelo Gompertz se enquadrou melhor à Massa Seca Total e à Massa Seca dos Colmos porque permite descrever três fases bem distintas da cultura. A primeira é a fase de estabelecimento, logo após a germinação, onde o crescimento é lento e predominantemente foliar. Na segunda fase a cana-de-açúcar apresenta desenvolvimento rápido e acúmulo de Massa Seca tanto Foliar quanto de Colmos. Na terceira e última fase o crescimento vegetativo se estabiliza, ficando a curva assintótica, e a cultura se prepara para entrar na fase reprodutiva, que é evitada pela indústria, pois provoca perda no teor de açúcar dos colmos.

O modelo cúbico se adapta melhor aos parâmetros que envolvem folhas (Massa Seca das Folhas e Índice de Área Foliar), pois, embora ao longo do ciclo as fases sejam basicamente as mesmas descritas para os Colmos, no final do ciclo esse modelo pode representar melhor a diminuição da quantidade de folhas, como preparação para o período reprodutivo.

A íntima relação entre a Massa Seca e a Área Foliar permitiu que o Índice de Área Foliar fosse melhor estimado através de regressão linear simples entre esses dois parâmetros. Porém, mesmo apesar do uso em condições desfavoráveis, os dados do aparelho LI-COR/LAI-2000 permitiram um bom ajuste com o Índice de Área Foliar, podendo ser usado caso não se disponha de medidas da Massa Seca Foliar.

O modelo alométrico linear foi o que apresentou melhores Coeficientes de Determinação e permite obter melhores estimativas da Produção de Massa Seca Total e de Colmos, se tomados apenas valores de Índice de Área Foliar abaixo de 3 (m^2 de folhas/ m^2 de terreno). Esse modelo tornou viável obter dados de Massa Seca a partir de medidas não destrutivas do Índice de Área Foliar, como as do aparelho LI-COR/LAI-2000 citado acima ou via satélite, o que reforçou a hipótese da viabilidade de se determinar a Fitomassa através de imagens orbitais.

A análise dos dados de Massa Seca Proporcional à Massa Seca Máxima do ciclo mostrou um comportamento padrão para os três ciclos, apesar das diferenças entre as condições reinantes em cada um dos ciclos. O modelo obtido com R^2 de 0,98 permite afirmar que é possível correlacionar a Massa Seca Proporcional aos Dias a partir do início do ciclo, ou seja, Dias Após o Corte do ciclo anterior.

Com base nesses modelos, a previsão da Produção Final de um determinado ciclo pode ser obtida através dos seguintes passos:

- Estimativa do Índice de Área Foliar e entrada do valor obtido no modelo de cálculo da Massa Seca dos Colmos "instantânea" ou atual (esta também poderia ser obtida através de análise destrutiva);

- Entrada do valor de Massa Seca dos Colmos e do número de Dias após o corte, ou início do ciclo, no modelo de Massa Seca Proporcional para a obtenção da Massa Seca dos Colmos Máxima ou Final, ou seja, a Produção Final da cultura.

Um ponto importante a se considerar é que seria desejável que se determinasse qual é o melhor período para se fazer essa estimativa da Produção atual visando estimar a Produção Final. Isso equivaleria a determinar um ponto no qual os fatores meteorológicos adversos já não teriam mais influência sobre o desempenho da cultura, ou que pelo menos apresentassem baixa probabilidade de ocorrência. Essa análise porém, exigiria uma amostragem mais ampla, usando vários anos e mais de dados, para que se pudesse abranger uma gama maior de fenômenos meteorológicos que influenciassem de maneiras distintas a Produção Final. De qualquer forma, esse valor deveria se situar após a metade da duração do ciclo, pois quanto mais tarde, menor a chance de erro. Porém, quanto antes essa estimativa for obtida, melhor o planejamento nas operações agrícolas, fabris e de mercado, aumentando a vantagem competitiva. Outro fator que justificaria essa estimativa precoce é a melhor estimativa da Massa Seca, ou Fitomassa, para valores de Índice de Área Foliar mais baixos, caso não se pudesse realizar amostragens destrutivas. Portanto, o ponto ótimo para essa estimativa deve se situar próximo à metade do ciclo.

5.2. Conclusões Sobre Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais de Campo

Os dados de Refletância medidos em campo produziram Índices de Vegetação que apresentaram baixa correlação com os dados de Índices de Área Foliar, desaconselhando o uso de valores obtidos por meio das equações apresentadas, principalmente na estimativa da Produção de Massa Seca com as Equações 4 a 6, o que levaria a erros multiplicativos.

Essa baixa correlação apresentada pode estar relacionada à influência da palhada da cana-de-açúcar sobre o comportamento da Refletância do dossel. Discutiu-se que ela pode ser responsável pelo comportamento anômalo em relação a outras culturas, tanto para a variação do ângulo de incidência solar, quanto para a variação do Índice de Vegetação ao longo do ciclo. Porém, essa hipótese exige medidas mais detalhadas e específicas que as

realizadas aqui, utilizando-se dados de uma esfera integradora acoplada ao espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 para que se possam obter conclusões mais fundamentadas.

Os Índices de Vegetação que apresentaram melhores resultados para as relações com o Índice de Área Foliar foram: Ratio, NDVI, RVI, NRVI, TVI, CTVI, TTVI, SAVI, TSAVI₁, TSAVI₂ e MSAVI₂. Esses índices apresentaram o mesmo comportamento e a mesma eficiência e foram selecionados os que apresentaram R² acima de 0,65. Os demais foram descartados, inclusive o PVI e as suas três variações.

Fracassou a tentativa de se obterem regressões para a estimativa da Produção de Massa Seca dos Colmos diretamente a partir dos Índices de Vegetação de Campo selecionados, pois um teste de aplicação das equações provocou erros muito grandes, quando os resultados foram comparados aos valores de Massa Seca de Colmos obtidos em campo. Porém, quando combinados esses valores a dados do ciclo, ou seja, Dias Após o Corte, as regressões foram boas e com Coeficientes de Determinação (R²) em torno de 0,83. Como esta última variável é fácil de se obter e produziu bons resultados, sua utilização é muito conveniente e foi adotada neste trabalho. Embora, na verdade, ela apenas represente outras variáveis meteorológicas como Graus-Dia ou a relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial, mais freqüentemente utilizadas em trabalhos de estimativa de Produção. A utilização de equações combinando Dias Após o Corte e Índices de Vegetação propicia a utilização de imagens de satélites no monitoramento e previsão da Produção Final.

Para estudos futuros, pode-se sugerir ainda a inclusão de outras variáveis como a diferença entre a Temperatura do ar e a Temperatura das folhas do dossel, que pode ser obtida em campo por meio de teletermômetros de radiação ou mesmo por satélites, como apresentado por ALMEIDA (1996 e 2000).

5.3. Conclusões sobre o Monitoramento do Crescimento da Cana-de-Açúcar por meio de Dados Espectrais do Satélite NOAA14/AVHRR

A principal hipótese que se queria testar era a de que o comportamento dos dados orbitais está coerente, ou bem correlacionado, com os dados de campo. Na realidade, como discutido, existe um indício de que isso esteja correto, visto que os dados orbitais tiveram o mesmo comportamento e as mesmas respostas que os dados de campo. Infelizmente, após a seleção de imagens orbitais de boa qualidade para as análises, não foi possível testar a correlação direta entre eles, pois o número final de campanhas comuns era de apenas três. Porém, o comportamento muito semelhante dos dois tipos de dados, após terem sido processados independentemente e por métodos diferentes, praticamente atesta essa boa relação.

Os Índices de Vegetação Orbitais que apresentaram melhores resultados para as relações com o Índice de Área Foliar foram praticamente os mesmos que os do item 3.4.1: Ratio, NDVI, PVI₃, NRVI, TVI, CTVI, TTVI, SAVI, TSAVI₁, TSAVI₂ e MSAVI₂. Esses índices apresentaram o mesmo comportamento e a mesma eficiência e os que foram selecionados apresentaram R² em torno de 0,71, um pouco mais alto que o dos dados de campo, porém com menor significância estatística. A única nova inclusão foi o PVI₃. Os demais foram descartados.

Da mesma forma que para os dados de campo, os modelos que utilizam o número de Dias Após o Corte, juntamente aos Índices de Vegetação Orbitais selecionados, também apresentaram uma melhoria significativa. Os valores de R² passaram para 0,95 quando incluída essa variável, que é de fácil obtenção e que não demanda processamentos ou transformações, sendo muito útil no monitoramento por satélite.

Um detalhe importante destacado também aqui é o comportamento anômalo do dia 17 de agosto de 1998, que à primeira vista deveria ser encarado como uma perda de informações. Porém, esse comportamento diferenciado permitiu verificar a sensibilidade dos métodos utilizados nos Capítulos 2, 3 e também no Capítulo 4.

5.4. Conclusões sobre a Hipótese Geral

A hipótese geral deste trabalho é ser possível estimar a Produção de Massa Seca dos Colmos da cana-de-açúcar a partir dos dados espectrais orbitais. Com base na literatura, escolheu-se o Índice de Área Foliar como a variável que possivelmente serviria de ligação entre esses dois parâmetros. Portanto, nas Equações 5 e 6 do item 2.5.3 estabeleceram-se correlações entre o Índice de Área Foliar e o logaritmo natural da Massa Seca dos Colmos e Total, com R^2 de 0,88 para os dois modelos.

Esses valores levaram à conclusão de que a correlação existe, permitindo um novo passo, que foi a estimativa de modelos que correlacionassem os valores de Índices de Vegetação de Campo ao Índice de Área Foliar. Os modelos obtidos na Tabela 13 do item 3.4.1 não apresentaram bons Coeficientes de Determinação (R^2) para os diversos Índices de Vegetação selecionados, ficando em torno de 0,68. Seguindo essa mesma linha de raciocínio, porém para os dados de satélite, obtiveram-se modelos para Índices de Vegetação Orbitais com R^2 em torno de 0,71 (Tabela 17 no item 4.3.2). Os índices selecionados para os dois tipos de dados (de campo e orbitais) foram os mesmos e com valores de R^2 muito próximos, mostrando que eles apresentam o mesmo comportamento.

Tentando comprovar a hipótese geral do trabalho, concluiu-se que a seqüência de utilização desses modelos deveria ser:

- estimar o Índice de Área Foliar a partir dos dados orbitais através dos modelos apresentados na Tabela 17;
- utilizar o resultado do item anterior para a estimativa da Produção de Massa Seca dos Colmos e Total, por meio das Equações 5 e 6, respectivamente (ambas instantâneas); e
- utilizar, na Equação 4, os valores de Produção de Massa Seca obtidos e o número de Dias Após o Corte para se estimar a Produção Final do ciclo.

Essa seqüência foi testada, porém já no segundo passo produziu dados inconsistente, provavelmente pelo baixo valor de R^2 e pela existência de erros multiplicativos, além do fato de as Equações 5 e 6 tornarem-se insensíveis a partir do Índice de Vegetação 3 ou 4. Esses

resultados levaram à conclusão de que a seqüência não deveria ser seguida, levando à busca de uma alternativa viável para a comprovação da hipótese geral.

Procurou-se, então estimar a produção de Massa Seca dos Colmos diretamente a partir dos Índices de Vegetação de Campo. Os resultados dos modelos não foram satisfatórios e não foram apresentados, pois produziram valores de R^2 abaixo de 0,55. Porém, ao se testarem regressões lineares múltiplas que possuíam como variável independente o número de Dias Após o Corte e o Índice de Vegetação, os valores de R^2 subiram para 0,83. Para os dados orbitais, esse mesmo tipo de regressão produziu ajustes ainda melhores, ficando em torno de 0,95.

Portanto, estes últimos modelos orbitais permitem aceitar a hipótese de que é possível estimar a Produção de Massa Seca dos Colmos a partir dos dados espectrais, desde que se incluam variáveis a respeito do ciclo, como número de Dias Após o Corte, ou meteorológicas como, Graus-Dia ou a relação Evapotranspiração Real/Evapotranspiração Potencial.

Aplicando os valores de Produção Instantânea na Equação 4, juntamente com o número de Dias Após o Corte, poder-se-ia estimar a Produção Final da cultura da cana-de-açúcar. Porém, a aceitação dessa hipótese demanda a observação de vários ciclos para que ela possa ser comprovada através de uma fase de verificação dos modelos obtidos.

5.5. Sugestões para Trabalhos Futuros

Novas hipóteses surgiram durante o desenvolvimento deste trabalho de tese como resultado da própria análise dos dados, porém nem todas puderam ser testadas aqui. Portanto, a seguir apresentam-se algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- As imagens do satélite NOAA15/AVHRR não foram utilizadas aqui por ainda não se dispor de um pacote computacional que permitisse fazer sua correção atmosférica. Portanto, desde já, pode-se sugerir a realização de estudos futuros para a determinação dos parâmetros necessários para realizar essa correção. Assim, com o próprio conjunto

de dados obtidos aqui, poder-se-ia utilizar análises semelhantes para o satélite NOAA15/AHVRR, que tem horários de passagem, imageamento ou varredura, diferentes do NOAA14/AVHRR, podendo ter seu comportamento influenciado pelo Ângulo de Inclinação Solar. Uma comparação entre os dados provenientes dos dois satélites para as mesmas campanhas seria importante para se determinar a viabilidade de ajuste de modelos incluindo as duas fontes de dados, ampliando o número de campanhas utilizáveis.

- Nas análises apresentadas, utilizou-se o número de Dias Após o Corte como variável independente, juntamente com os dados orbitais. Essa variável poderia ser substituída ou complementada por variáveis meteorológicas ou ecofisiológicas, graus-dia ou a relação ETR/ETP, por exemplo, como forma de melhorar os modelos obtidos. A combinação das análises realizadas aqui para as bandas visíveis do espectro eletromagnético com as realizadas por ALMEIDA (2000) para as bandas termais, para as mesmas campanhas e passagens, permitiria a extração do máximo de informações que se pode obter a partir desses satélites e poderia levar à obtenção de modelos mais completos, consistentes e eficientes.
- Acredita-se que a palhada da cana-de-açúcar possua uma influência sobre os dados de Refletância da superfície de maneira parecida à do solo, porém em outra faixa do espectro eletromagnético podendo, portanto, alterar significativamente os valores de Índice de Vegetação obtidos. Uma análise mais detalhada das diferenças entre o comportamento espectral da folha verde e da palhada poderia ser feita utilizando-se uma esfera integradora acoplada ao espectrorradiômetro LI-COR/LI-1800 ou mesmo em campo, variando o ângulo de iluminação. A partir dessas medidas poder-se-ia analisar a influência de diversas combinações folha/palhada/solo sobre o resultado final do Índice de Vegetação. Isso seria importante para determinar se a cana-de-açúcar realmente apresenta esse comportamento anômalo em relação às outras culturas citadas na literatura e para detectar as suas causas.
- Uma limitação do método de estimativa da Produção a partir de dados espectrais é a necessidade de correção atmosférica, pois essa correção necessita da obtenção de

dados da Radiação Direta Incidente sobre a área de estudo, que não são medidos corriqueiramente. MORAN et al. (1991) sugerem que a correção atmosférica pode ser feita baseando-se apenas na imagem orbital, considerando os modelos de atmosfera específicos presentes no 5S, por exemplo. A adaptação desse método à correção de imagens NOAA permitiria que se prescindisse dos dados de Radiação Direta Incidente, possibilitando a utilização do banco de imagens para as quais esse parâmetro não foi medido. Dentro do escopo deste trabalho, o uso de um número muito maior de imagens desse banco levaria a definir modelos mais representativos e consistentes, pois seriam baseados num número maior de anos correlacionando os Índices de Vegetação aos dados de Produção medidos pela usina. Ampliaria também as possibilidades de utilização dessas imagens para diversos outros fins.

6. Referências Bibliográficas

- ALFONSI, R. R.; PEDRO Jr., M. J.; BRUNINI, O. & BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). *Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização*. Campinas, Fundação Cargill, 1987. v. 1, cap. 1, p.42-55.
- ALMEIDA, C. A. S. Estimativa da Temperatura de superfície cultivada com trigo (*Triticum aestivum* L.) usando dados NOAA-14/AVHRR. Campinas, 1996. 102p. (Mestrado - Unicamp).
- ALMEIDA, C. A. S.; PINTO, H. S.; ZULLO Jr., J.; HAMADA, E. & PELLEGRINO, G. Q. Estimativa de Temperatura de superfície cultivada com trigo usando dados NOAA/AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. *Anais em CD-ROM*. Salvador, BA, 1996.
- ALMEIDA, C. A. S. Comunicação pessoal. 2000.
- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T. & HATFIELD, J. L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, **76**:300-306, march/april, 1984.
- ASRAR, G.; KANEMASU, E. T. & YOSHIDA, M. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and Solar angle. *Remote Sensing of Environment*, New York, **17**:1-11, 1985.
- ASRAR, G.; MYNENI, R. B. & CLOUDHURY, B. J. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: a modeling study. *Remote Sensing of Environment*, New York, **41**:85-103, 1992.

- BANNARI, A.; HUETE, A. R.; MORIN, D. & ZAGOLSKI. Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. *International Journal of Remote Sensing*, **17** (10):1885-1906, 1996.
- BARBIERI, V.; BACCHI, O. S. & VILLA NOVA, N. A. Análise do fator temperatura média do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., Mossoró, RN, 1979.
- BARET, F.; GUYOT, G. & MAJOR, D. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING AND IGARSS'90, 12., Vancouver, Canada, 1989. v. 4.
- BARET, F. & GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, New York, **35**:161-173, 1991.
- BARNETT, T. L. & THOMPSON, D. R. The use of large-area spectral data in wheat yield estimation. *Remote Sensing of Environment*, New York, **12**:509-518, 1982.
- BISWAS, B. C. *Agroclimatologia del cultivo de la caña de azucar*. Ginebra, 1986. 190p.
- BRUNINI, O. *Curso de agrometeorologia da cana-de-açúcar; temperatura do ar - cultura da cana-de-açúcar*. Campinas, IAC, 1997. p.55.
- CASANOVA, D.; EPEMA, G. F. & GOUDRIAAN, J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. *Field Crops Research*, **55**:83-92, 1998.
- CLEVERS, J. G. P. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, New York, **29**:25-37, 1989.
- COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **3** (3):175-183, 1974.

- CONESE, C.; MASELLI, F.; DI VECCHIA, A.; SENNI, B. & MARACCHI, G. Crop yield estimation and forecasting in Niger using NOAA AVHRR data. In: Bilan hydrique agricole et sécheresse en Africa tropicale. Paris: Ed. John Libbey Eurotext, 1994. Cap. 7, p. 67-75.
- DEERING, D. W.; ROUSE, J. W.; HAAS, R. H. & SCHELL, J. A. Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 10., 1975. *Proceedings*. 1975. v. 2, p.1169-1178.
- DUGGIN, M. J. & CUNIA, T. Ground reflectance measurement techniques: a comparison. *Applied Optics*, **22** (23):3771-3777, 1983.
- EASTMAN, J. R. *Guide to GIS and image processing - Idrisi 32*. Worcester, Idrisi Production, 1999. 170p.
- FUNCAMP - Fundação de desenvolvimento da Unicamp. *Sistema de simulação de crescimento e produtividade econômica de cana-de-açúcar*. Campinas, Funcamp, 1983. 128p.
- GALLO, K. P. & EIDENSHINK, J. C. Differences in visible and near-IR responses, and derived vegetation indices, for the NOAA-9 and NOAA-10 AVHRRs: a case study. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **54** (4):485-490, 1988.
- GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; & ALMEIDA Filho, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannas. *Remote Sensing of Environment*, New York, **67**:181-193, 1999.
- GOWARD, S. N.; MARKHAM, B.; DYE, D. G.; DULANEY, W. & YANG, J. Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. *Remote Sensing of Environment*, New York, **35**:257-277, 1991.

- GSC - General Sciences Corporation. *METPRO - Workstation User's Guide. Version 3.1.* Laurel, Maryland, USA : GSC, 1994. 288p.
- GU, X. F.; GUYOT, G. & VERBRUGGHE, M. Evaluation of measurement errors on the reflectance of "la crau", the french SPOT calibration area . In: EARSEL SYMPOSIUM, 10., Toulouse, 5-8 junho - 1990. *Proceedings.* Toulouse, 1990. p.121-133.
- GU, X. F. Étalonage et intercomparaison des données satellitaires en utilisant le site teste de la crau. Paris, 1991. 260p. (Doutorado - Université Paris VII).
- GUTMAN, G. The derivation of vegetation indices from AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, **8** (8):1235-1243, 1987.
- GUTMAN, G. G. Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. *Remote Sensing of Environment*, New York, **35**:121-136, 1991.
- HAMADA, E. Comunicação pessoal. 2000.
- HAMADA, E.; PINTO, H. S.; ZULLO JR, J.; ALMEIDA, C. A. S. & PELLEGRINO, G. Q. Processamento digital de imagens de satélite meteorológico para avaliação de biomassa de trigo. In: AGROSOFT'95 - SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE INFORMATIZAÇÃO DA AGROPECUÁRIA, Juiz de Fora, MG, outubro de 1995. *Anais.* Juiz de Fora, MG, Softex 2000, 1995.
- HAMADA, E.; PINTO, H. S.; ZULLO JR, J.; ALMEIDA, C. A. S. & PELLEGRINO, G. Q. Relação entre a Produção de biomassa de trigo e medidas multi-temporais de índice de vegetação (NDVI), a partir de dados AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. *Anais em CD-ROM.* Salvador, BA, 1996.
- HUETE, A. R.; JACKSON, R. D. & POST, D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, New York, **17**:37-53, 1985.

- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, New York, **25**:295-309, 1988.
- HUMBERT, R.P. *The growing sugarcane*. Elsevier Pub. company, Amsterdam. 1968.
- IDSO, S. B.; PINTER Jr., P. J.; JACKSON, R. D. & REGINATO, R. J. Estimation of grain yields by remote sensing of crop senescence rates. *Remote Sensing of Environment*, New York, **9**:87-91, 1980.
- IPPOLITI-RAMILO, G.A.; EIPHANIO, J.C.N.; SHIMABUKURO, Y.E. & FORMAGIO, A.R. Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras. *Agricultura em São Paulo*, São Paulo. **46**(1):89-101, 1999.
- JACKSON, R. D. ; PINTER Jr., P. J. ; IDSO, S. B. & REGINATO, R. J. Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. *Applied Optics*, **18** (22):3720-3732, 1979a.
- JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, **50** (4):663-666, 1969.
- KIMES, D. S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies. *Applied Optics*, **22** (9):1364-1372, 1983.
- LI-COR. *Instruction manual - LI-1800 portable spectroradiometer*. Lincoln Nebraska, Li-COR, inc., 1989. 120p.
- LI-COR. *LAI-2000 plant canopy analyzer - instruction manual*. Lincoln Nebraska, LI-COR, inc., 1992. 166p.
- LONDON, J.; BOJROU, R. J.; OLTMANS, S. & KELLEY, J. I. Atlas of the global distribution of total ozone july 1957 - june 1967. Ncar Technical Note n. 13 + STR. 1976.

- MAAS, S. J. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agron. J.*, **80**:655-662, 1988.
- MACHADO, E. C. Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria Seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum sp*). Campinas, 1981. 115p. (Mestrado - Unicamp).
- MACHADO, E. C. Fisiologia de Produção de cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). *Cana-de-açúcar. Cultivo e utilização*. Campinas, Fundação Cargill, 1987. v. 1, cap. 1, p.56-87.
- MAGALHÃES, A. C. N. Análise quantitativa do crescimento. In: FERRI, M. O. (Coord.). *Fisiologia vegetal*. 2 edição. São Paulo, EPU, 1985. v. 1, p.333-350.
- MASELLI, F.; CONESE, C.; PETKOV, L. & GILABERT, M. A. Environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel through the use of NOAA NDVI data. A case study: Niger 1986-89. *Int. J. Remote Sens.*, **14** (18):3471-3487, 1993.
- MORAN, M. S.; JACKSON, R. D.; SLATER, P. N. & TEILLET, P. M. Comparison of atmospheric correction procedures for visible and near-ir satellite sensor output. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON PHYSICAL MEASUREMENTS AND SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 5., Couchevel, 14-18 janeiro-1991, Ed. ESA SP-319, 1991. p.7-12.
- MOREIRA, R. C. Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação. São José dos Campos, 2000. 179p. (Mestrado - INPE).

- PEARSON, R. L. & MILLER, L. D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., Ann Arbor, 1972. *Proceedings*. Ann Arbor, ERIM, 1972. v. 2, p.1355-1379.
- PERRY Jr., C. R. & LAUTENSCHLAGER, L. F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, New York, **14**:169-182, 1984.
- PINTO, H. S. & PELLEGRINO, G. Q. Imagens para monitoramento e estimativa de desenvolvimento vegetal. In: WORKSHOP SOBRE A BACIA DO PIRACICABA: O ESTADO ATUAL E DIRETRIZES PARA O FUTURO. *Anais*. São Pedro, SP, Centro de Energia Nuclear na Agricultura-USP, CNPq, FAPESP e ESSO, maio de 1995.
- QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H. & SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing and the Environment*, **48**:119-126, 1994.
- QUARMBY, N. A.; MILNES, M.; HINDLE, T. L. & SILLEOS, N. The use of multi-temporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *Int. J. Remote Sens.*, **14** (2):199-210, 1993.
- RICHARDSON, A. J. & WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **43** (12):1541-1552, 1977.
- ROSENBERG, N. J. The radiation balance. In: ROSENBERG, N. J. *Microclimate: the biological environment*. United States of America, John Wiley & Sons, Inc., 1974. p.5-62.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A. & DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3. 1973. v. 1, p.309-317.

- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. & HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Maryland. 1974.
- RUDORFF, B. F. T. & BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sensing of Environment*, New York, **33**:183-192, 1990.
- SEGARRA, D. Introducción al tratamiento digital de imágenes. In : GANDIA, S. & MELIÁ, J. *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables : agricultura. Curso de postgrado*. Valencia, España, Universidad de Valencia, 1991. p.217-240.
- SUBBA RAO, H. S. & PRASAD, R. B. Studies in India on the germination of sugarcane. *Ind. J. Plant. Physiology*, **3** (2):181-194, 1960.
- TANRÉ, D.; DEROO, C.; DUHAUT, P.; HERMAN, M.; MORCRETTE. J. J.; PERBOS, J. & DESCHAMPS, P. Y. *Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (5S)*. 1987. 148p.
- TANRÉ, D.; DEROO, C.;DUHAUT, P.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J.; PERBOS, J. & DESCHAMPS, P.Y. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: The 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, **11**(4):659-668, 1990.
- TERUEL, D. A. Modelagem do índice de área foliar de cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos. Piracicaba, 1995. 93p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- THIAM, A. K. Geographic information systems and remote sensing methods for assessing and monitoring land degradation in the Sahel: the case of Southern Mauritania. Worcester Massachusetts, 1997. (Doutorado - Clark University).

- TUCKER, C. J.; HOLBEN, B. N.; ELGIN Jr., J. H. & McMURTREY, J. E. III. Relationship of spectral data to grain yield variation. *Photogram. Engr. and Remote Sensing*, **46**:657-666, 1980.
- UNGANAI, L. S. & KOGAN, F. N. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment*, New York, **63**:219-232, 1998.
- VIANELLO, R. L. & ALVES, A. R. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa, UFV : Impr. Univ., 1991. 449p.
- WELLES, J.M. Some Indirect Methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews*, United Kingdom, **5** (1):31-43, 1990.
- WELLES, J. M. & NORMAN, J. M. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal*, **83** (5):818-825, 1991.
- WIEGAND, C. L. & RICHARDSON, A. J. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I. Rationale. *Agron. J.*, **82**(3):623-629, 1990.
- WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J.; ESCOBAR, D. E. & GERBERMANN, A. H. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, New York, **35**:105-119, 1991.
- ZULLO Jr., J. & ARRUDA, F. B. *Programa computacional para ajuste de equações em dados experimentais*. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 23p. (Boletim Técnico nº 113).
- ZULLO Jr., J.; GU, X. F. & GUYOT, G. Estimation de l'épaisseur optique des aérosols à partir de la mesure de l'éclairement spectral global. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON PHYSICAL MEASUREMENTS AND SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 6., Val d'Isère (França), 17-21 janeiro-1994a, p.173-178.

ZULLO Jr., J.; GUYOT, G.; GU, X. F. & BEZERRA, P. C. Importância da correção atmosférica no cálculo do índice de vegetação a partir de imagens de satélite. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23., Campinas, 18-21 julho - 1994b, 12p.

ZULLO Jr., J. Correção atmosférica das imagens de satélite e aplicações. Campinas, 1994. 191p. (Doutorado - DCA/FEE/UNICAMP).

ZULLO Jr., J.; GU, X.; GUYOT, G.; PINTO, H. S.; HAMADA, E.; ALMEIDA, C. A. S. & PELLEGRINO, G. Q. Estimativa do conteúdo de vapor d'água a partir da radiação solar direta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. *Anais em CD-ROM*. Salvador, BA, 1996.

ZULLO Jr., J. Comunicação pessoal. 2000.