

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR
CONSIDERANDO A VARIAÇÃO ESPACIAL DE DADOS
ESPECTRAIS DO SATÉLITE LANDSAT 7 - ETM+**

HERMÓGENES MOURA MACHADO

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR
CONSIDERANDO A VARIAÇÃO ESPACIAL DE DADOS
ESPECTRAIS DO SATÉLITE LANDSAT 7 - ETM+**

Dissertação de Mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola, na área de concentração em
Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

HERMÓGENES MOURA MACHADO

Orientador: Prof. Dr. RUBENS AUGUSTO CAMARGO LAMPARELLI

Co-Orientador: Prof. Dr. JANSLE VIEIRA ROCHA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2003

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

M18d Machado, Hermógenes Moura
Determinação da biomassa de cana-de-açúcar considerando a variação espacial de dados espectrais do satélite Landsat 7 – ETM + / Hermógenes Moura Machado. --Campinas, SP: [s.n.] 2003.

Orientadores: Rubens Augusto Camargo Lamparelli, Jansle Vieira Rocha

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Sensoriamento remoto. 2. Imagens multiespectrais. 3. Biomassa vegetal. 4. Cana-de-açúcar. 5. Agricultura – Estimativa de rendimento. 6. Produtividade agrícola. 7. Modelos matemáticos. I. Lamparelli, Rubens Augusto Camargo. II. Rocha, Jansle Vieira. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Determination of sugarcane biomass considering ETM⁺/Landsat 7 spectral response variation.

Palavras-chave em Inglês: Remote sensing, Vegetation index, Biomass, Sugarcane, Yield estimate, Statistical model.

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: Márcio de Morisson Valeriano e Jurandir Zullo Junior

Data da defesa: 28/02/2003

A beleza da criação reflete a infinita beleza do criador. Ela deve inspirar o respeito e a submissão da inteligência do homem e de sua vontade.

Fonte: Catecismo da Igreja Católica.

Aos meus pais José Maria Machado (in memoriam) e Rosa Messias Moura Machado e irmãos, por toda a alegria, esperança e amor, ofereço.

A Kamila, minha esposa, por todo o amor, apoio, estímulo, paciência, dedico.

Agradeço,

primeiramente a Deus, pelo auxílio na conclusão de mais esta importante etapa em minha vida e de minha família.

aos Professores Rubens Augusto Camargo Lamparelli e Jansle Vieira Rocha, pela amizade, incentivo, apoio e orientação na realização deste trabalho.

a Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela oportunidade de realização do curso e auxílio financeiro nos trabalhos de campo.

ao Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas em Agricultura (CEPAGRI) da UNICAMP, na pessoa do Professor Hilton Silveira Pinto, pelo auxílio na utilização de equipamentos e outros recursos para realização dos trabalhos de campo.

a Usina São João de Araras, pela disponibilidade da área de estudo, auxílio nos trabalhos de campo e intercâmbio com seus profissionais.

a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Fundo de Apoio ao Ensino e à Pesquisa (FAEP) pelo auxílio financeiro na realização do trabalho.

aos órgãos de fomento CNPq e CAPES pelo fornecimento da bolsa de estudos e auxílio na divulgação dos resultados.

Ao aos órgãos de fomento CNPq e CAPES pelo fornecimento da bolsa de estudos e auxílio na divulgação dos resultados.

ao Projeto SAI/PRONEX-MCT, pelo fornecimento do micro-computador utilizado na realização deste trabalho.

aos colegas do CEPAGRI e do Laboratório de Geoprocessamento pelo companheirismo e colaboração durante a realização deste estudo.

A todos os demais que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado.

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | viii |
| LISTA DE TABELAS..... | x |
| RESUMO..... | xi |
| ABSTRACT | xii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. JUSTIFICATIVA | 3 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 4 |
| 3.1. Cana-de-Açúcar | 4 |
| 3.2. Estimativa de Safra na Usina | 5 |
| 3.3. Variação em Relação à Resposta Espectral | 6 |
| 3.4. Aplicação de Sensoriamento Remoto na Agricultura | 9 |
| 3.5. Índices de Vegetação | 10 |
| 3.6. Correção Atmosférica | 15 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS..... | 17 |
| 4.1. Área de Estudo..... | 17 |
| 4.2. Dados Espectrais..... | 19 |
| 4.3. Material | 20 |
| 4.4. Metodologia..... | 22 |
| 4.4.1. Correção atmosférica das imagens | 22 |
| 4.4.2. Correção geométrica das imagens | 25 |
| 4.4.3. Resposta espectral | 25 |
| 4.4.4. Primeiro ano de coleta de dados | 26 |
| 4.4.5. Segundo ano de coleta de dados | 30 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 5.1. Correção Atmosférica | 34 |
| 5.1.1. Estudo da variação dos parâmetros atmosféricos..... | 34 |
| 5.1.2. Correção atmosférica das imagens..... | 36 |
| 5.2. Resultados do Primeiro Ano de Estudo..... | 38 |
| 5.2.1. Análise geral da relação entre a produtividade e os dados espectrais | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 5.3. Resultados do Segundo Ano de Estudo..... | 41 |
| 5.3.1. Análise geral da relação entre a produtividade e os dados espectrais | 41 |
| 5.3.2. Comportamento da produtividade e sua resposta espectral entre as duas campanhas | 42 |
| 5.3.3. Considerações em relação a metodologia..... | 46 |
| 5.3.4. Análise das melhores correlações encontradas..... | 46 |
| 5.3.5. Simulação do modelo de produtividade | 49 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 52 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 54 |
| ANEXO 1..... | 61 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Ciclo evolutivo da cana de 12 e 18 meses na região Sudeste do Brasil..... | 5 |
| Figura 2 – Curvas espectrais da vegetação verde, solo e vegetação não-fotossinteticamente ativa, correspondentes a espectros de laboratório. | 7 |
| Figura 3 – Localização da área de estudo (município de Araras, Leme e Rio Claro) no Estado de São Paulo. | 17 |
| Figura 4 – Distribuição espacial dos talhões estudados (em amarelo), pertencentes à Usina São João Açúcar e Álcool..... | 18 |
| Figura 5 – Fluxograma da metodologia utilizada. | 23 |
| Figura 6 – Obtenção da radiação direta com o radiômetro solar CIMEL-317, durante o período da passagem do satélite. | 25 |
| Figura 7 – Distribuição espacial das amostras sobre uma imagem referente a banda 4, considerando a variação espacial da cana-de-açúcar..... | 27 |
| Figura 8 – Detalhe de uma parcela demarcada para sua posterior avaliação. | 28 |
| Figura 9 – Localização e limitação das amostras e seleção dos pixels para análise da representatividade da resposta espectral..... | 29 |
| Figura 10 – Detalhe do carregamento de uma amostra e de uma amostra após a colheita. | 32 |
| Figura 11 – Variação horária da radiação direta para duas condições atmosféricas. | 34 |
| Figura 12 – Variação espectral da espessura ótica em diferentes datas. | 35 |
| Figura 13 – Composição Colorida RGB 453 da imagem de 16/07/2002 sem e com correção atmosférica..... | 37 |
| Figura 14 – Comportamento espectral da cana-de-açúcar em relação ao comportamento padrão da vegetação verde e do solo. | 38 |
| Figura 15 – Gráfico da equação de regressão entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI referentes à imagem de 23/03/2001..... | 40 |
| Figura 16 – Comportamento dos dados de produtividade e da resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI nas diversas amostras pertencentes às duas campanhas realizadas. | 44 |
| Figura 17 – Gráficos das equações de regressão linear aplicadas entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI referentes à imagem de 27/04/2002..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 18 – Gráficos das equações polinomiais de 2º grau aplicadas entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI referentes à imagem de 27/04/2002..... | 48 |
| Figura 19 – Gráficos das equações de regressão linear aplicadas entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 referentes à imagem de 16/07/2002. | 49 |
| Figura 20 – Gráfico da equação de ajuste entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 para a imagem de 27/04/2002 (a). Gráfico da equação de regressão aplicada entre a produtividade observada e a produtividade estimada pelo modelo (b). | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Características espectrais e espaciais do sensor ETM ⁺ do Landsat-7 | 19 |
| Tabela 2: Dados utilizados para escolha e análise dos talhões em estudo. | 21 |
| Tabela 3: Descrição dos grupos de amostras analisadas no segundo ano. | 31 |
| Tabela 4: Parâmetros atmosféricos utilizados para correção das imagens Landsat. | 36 |
| Tabela 5 – Coeficientes de determinação obtidos nas correlações entre a produtividade e a resposta espectral. | 39 |
| Tabela 6 – Coeficientes de determinação obtidos nas correlações entre a produtividade e a resposta espectral. | 42 |
| Tabela 7– Dados de produtividade e sua resposta espectral referente às duas campanhas de 2002. | 43 |
| Tabela 8 – Dados de produtividade real e estimada pelo modelo. | 50 |

RESUMO

O monitoramento e estimativa da quantidade de biomassa da cana-de-açúcar são de fundamental importância no planejamento das atividades de condução, colheita, transporte, processamento e comercialização da produção. Com o avanço tecnológico, técnicas de sensoriamento remoto têm-se mostrado úteis no monitoramento de áreas agrícolas onde se tem observado o potencial em especial do sistema Landsat no fornecimento de informações sobre a cultura da cana-de-açúcar. Dentre estas técnicas pode-se citar a aplicação de índices de vegetação obtidos através de transformação linear entre o valor espectral das diferentes bandas do sensor.

Com o objetivo de avaliar a aplicação de imagens multiespectrais do satélite Landsat 7 - ETM⁺ e dos diversos índices de vegetação, no mapeamento da variação espacial da biomassa, e o seu potencial para estimativa da produtividade utilizando-se de um modelo matemático. O estudo foi desenvolvido nos municípios de Araras e Leme – SP. Para os dois anos de estudo foram analisadas duas passagens por ano, sendo a primeira anterior à colheita (fevereiro a abril) e a segunda dias antes da colheita. As imagens em nível de cinza foram transformadas em valores de reflectância aparente e, através da correção atmosférica, para valores de reflectância real. Sob a área de estudo foram distribuídas amostras de acordo com a variação espacial da resposta espectral. As amostras foram localizadas, demarcadas e colhidas. Foram realizadas análises de correlação entre os valores de produtividade e sua resposta espectral. A correção atmosférica não influenciou na correlação entre os dados de produtividade e a resposta espectral. As melhores correlações foram encontradas com os valores da banda 4 (IVP) e do índice de vegetação GVI. No primeiro ano de estudo os valores da banda 4 e do GVI explicaram respectivamente 51,6% e 52,66% da variação da produtividade. Enquanto que no segundo ano ambos explicaram 83% da variação da produtividade. O modelo polinomial de 2^o grau foi o que melhor se adaptou ao comportamento dos dados de produtividade da cultura. A produtividade estimada pelo modelo apresentou um erro médio de 4,04t/ha e um desvio padrão de 2,47t/ha, este resultado comprovou eficiência da utilização da resposta espectral no processo de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The monitoring and biomass estimate in sugar cane are the fundamental importance in leading, harvest, transport, processing and production marketing.

With the technologic advanced techniques in remote sensing has showed very high potential in monitoring of sugarcane areas in special the Landsat system. Among these techniques it can to mention the application of the vegetation indices.

Therefore that work has the objective of to evaluate the application of ETM⁺/Landsat 7 spectral images and different vegetation index to mapping biomass spatial variation and its potential for yield estimate using statistical model.

The study was developed in Araras and Leme / SP counties at São João Mill in two years. During that time were analyzed two images per year, being the first before the harvest (February to April) and the second just some days before the harvest. The images in raw level had been transformed into values of apparent reflectance and through the atmospheric correction to values of real reflectance.

Through the study area were allocated samples according the spectral response variation. After than this were full filled correlation analysis between yield and spectral response. The atmospheric correction hasn't provoked influence in the correlations.

The best correlations had been found with the values of the band 4 (IVP) and of the index of vegetation GVI. In the first year of study band 4 and GVI indices values had explained 51.6% and 52.66% of the variation of the yield, respectively. While that in the second year both had explained 83% of the yield variation. The polynomial model of 2^o degree had the best agree in relation of the yield data behavior. The estimative productivity calculated by the model presented an average error of 4.04t/ha and a standard deviation of 2.47t/ha, attesting the efficiency of the use of the spectral response in the process of the yield estimate in sugar cane culture.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar assume destaque especial no desenvolvimento da atividade agrícola do país e principalmente do Estado de São Paulo.

Por se tratar de uma atividade agrícola altamente tecnificada, faz-se necessário a obtenção de inúmeras informações que caracterizem o ambiente agrícola para seu monitoramento e gerenciamento. Dentre estas informações, a estimativa do potencial de produção assume um papel essencial para o planejamento do transporte, armazenamento, processamento e comercialização da produção, bem como da tomada de decisão relacionada à elaboração de políticas agrícolas.

O método utilizado para se estimar o potencial de produção deve fornecer as informações com antecedência, precisão, rapidez e a um custo acessível.

Atualmente a estimativa do potencial de produção de cana-de-açúcar é realizada no período que antecede a colheita baseando-se na experiência de técnicos, através de observações de campo utilizando-se de amostragens, dados de anos anteriores, não considerando a distribuição espacial da área plantada e sua variação. Sendo que esta realidade é responsável por grande parte dos erros na estimativa de safra, principalmente em locais de maior heterogeneidade.

Com o avanço tecnológico, técnicas de sensoriamento remoto têm-se mostrado úteis no monitoramento de áreas agrícolas onde se tem observado o potencial em especial do sistema Landsat no fornecimento de informações sobre a cultura da cana-de-açúcar. Dentre estas técnicas pode-se citar a aplicação de índices de vegetação obtidos através de transformação linear entre o valor espectral das diferentes bandas do sensor.

O desenvolvimento de novos sensores orbitais de alta resolução espacial e espectral e a perspectiva de maior periodicidade de imagens em um futuro próximo tem incentivado a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto no estudo de características espectrais da vegetação e sua aplicação no processo de estimativa do potencial de produção.

A utilização do sensoriamento remoto nos permite analisar a distribuição espacial das áreas plantadas, possibilitando o mapeamento das diferenças de vigor da cultura (variações de biomassa), auxiliando no melhor direcionamento de amostragens e observações de campo, promovendo uma melhor avaliação do potencial de produção da área cultivada.

O estudo da análise de correlação e ajuste de modelos matemáticos que representem a relação entre a produtividade e sua resposta espectral, através da utilização de dados espectrais (níveis de cinza ou reflectância), pode contribuir para uma maior precisão na estimativa da produção da cana-de-açúcar.

Baseando se na hipótese de correlação entre a quantidade de biomassa de um dossel vegetal e sua resposta espectral, o trabalho assume o objetivo de estudar a aplicação dos dados espectrais assim como os índices derivados de imagens multiespectrais do satélite Landsat 7, sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM⁺), obtida em época de início do período de safra, para o mapeamento da variação espacial da cultura de cana-de-açúcar, visando determinar o seu potencial de utilização no processo de estimativa da produção. Apresentando ainda, como objetivos específicos:

- Avaliar a contribuição do método de correção atmosférica no resultado das correlações da biomassa e a resposta espectral;
- Avaliar o desempenho dos diversos índices de vegetação, assim como dos diferentes canais de resposta espectral do sensor ETM⁺ (Landsat 7) na determinação da variação espacial da produtividade;
- Desenvolver uma metodologia para coleta de dados de biomassa da cana-de-açúcar que esteja adequada às condições e disponibilidade de recursos da usina;
- Estabelecer um modelo de correlação entre o comportamento espectral da cultura de cana-de-açúcar e sua produtividade, utilizando-se da resposta espectral.

2. JUSTIFICATIVA

Analisando a aplicação da metodologia utilizada por RUDORFF (1985) com os recursos atuais, no que se refere à precisão em relação à resposta espectral, equipamentos e técnicas para processamento e localização das amostras de produção, pode-se justificar a hipótese de uma melhoria na correlação e ajuste dos modelos de estimativa dos dados de produção através de sua resposta espectral.

Uma análise atual da relação entre a biomassa da cana-de-açúcar e os dados espectrais justificam-se diante da necessidade de aperfeiçoamento de modelos matemáticos, baseados na resposta espectral, que representem a variação dos dados de produção da cana-de-açúcar para as condições atuais em relação às características de campo como variedades, manejo, entre outras e principalmente através da utilização de equipamentos e metodologias de análise com maior desenvolvimento tecnológico.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, o trabalho será contextualizado por diversos conceitos, métodos e informações já existentes, das quais, torna-se possível diagnosticar um problema existente, indicando possíveis caminhos a serem seguidos para se atingir os objetivos propostos por esta pesquisa.

3.1. Cana-de-Açúcar

Justificando a escolha da cultura a ser estudada, faz-se necessário sua apresentação, para um melhor entendimento do objeto de estudo.

Devido ao seu potencial produtivo e excelente adaptação ao clima do Brasil, a cana-de-açúcar destaca-se como uma cultura que exerceu grande importância econômica ao longo de nossa história.

Hoje encontra-se entre as culturas mais tecnificadas e capacitadas no que diz respeito ao uso de técnicas para seu gerenciamento. Através do uso de um banco de dados é permitido o acesso rápido e direcionado às informações cadastradas, promovendo através da análise destas informações um melhor planejamento e controle técnico da área agrícola (JOAQUIM, 1998).

A cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene pertencente ao gênero *Saccharum*, apresentando máximo potencial de produção na fase vegetativa, completando seu ciclo através de um déficit hídrico ou térmico, a fim de acumular sacarose nos colmos (JOAQUIM, 1998).

O ciclo evolutivo da cultura está apresentado na figura 1, onde são mostrados dois ciclos: um com a evolução da cana de 12 meses e outro com da cana de 18 meses. Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser de 12 meses para todas as variedades.

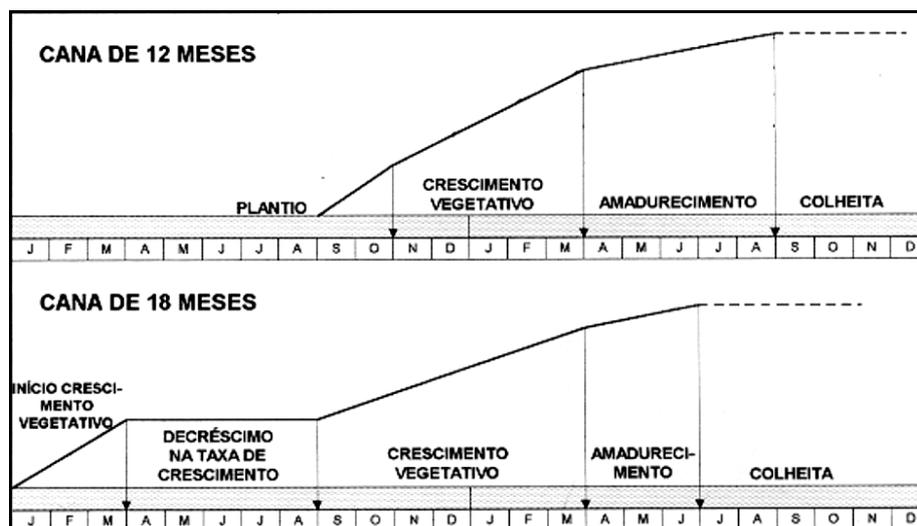


Figura 1 – Ciclo evolutivo da cana de 12 e 18 meses na região Sudeste do Brasil.

Fonte: ALFONSI et al. (1987).

3.2. Estimativa de Safra na Usina

Dentre as informações necessárias ao planejamento e direcionamento das atividades da lavoura, a estimativa do potencial de produção utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto tem sido motivo de estudos em diversos trabalhos, tanto para cana-de-açúcar como para outras culturas (PELLEGRINO, 2001; PINTER et al., 1981; RUDORFF, 1985; RUDORFF e BATISTA, 1988).

RUDORFF (1985) descreve a metodologia utilizada na previsão de safra da Usina Barra Grande em Lençóis Paulista através de duas abordagens: subjetiva e objetiva. A subjetiva é feita através da visita dos técnicos às lavouras antes do início da safra, e depende muito da experiência dos técnicos. Para contornar esta subjetividade, uma prática objetiva também é realizada, pouco antes do início da colheita, através da amostragem em algumas áreas canavieiras, onde são contadas e pesadas amostras de colmos distribuídos nos talhões para obtenção da produtividade média.

De certa forma pode-se considerar que a Usina São João adota uma metodologia de estimativa de safra bastante semelhante à descrita por RUDORFF (1985), diferenciando apenas nas datas de previsão, sendo que a primeira estimativa é realizada logo após a colheita, onde o técnico observa com maior detalhe levando em conta o rendimento de cada talhão na última safra, tipo de solo, fertilidade, estrutura, matéria orgânica, comportamento da

variedade, ano de corte, práticas de manejo, ataque de pragas, doenças e condições climáticas, entre outros.

A segunda estimativa de safra é realizada entre os meses de fevereiro e março, período que antecede a colheita, onde todos os fatores considerados na primeira estimativa são novamente examinados e comparados com a análise visual do técnico ao redor dos carregadores dos talhões de cana-de-açúcar. Observa-se nesta inspeção, que o técnico analisa o comportamento das plantas principalmente nas bordas dos talhões, desconhecendo a proporção e a distribuição em todo o talhão de possíveis padrões diferenciados nas bordas da cultura.

Diante da dificuldade e subjetividade na aplicação desta metodologia de estimativa de safra, a utilização do sensoriamento remoto, através de dados orbitais do satélite Landsat-7 ETM⁺, pode auxiliar na estimativa de safra da cultura da cana-de-açúcar.

Para obtenção de informações a fim de se estimar a produção de uma lavoura de cana-de-açúcar, primeiramente é necessário o conhecimento dos fatores que influenciam na resposta espectral da cultura imageada pelo satélite.

3.3. Variação em Relação à Resposta Espectral

A partir do estudo do comportamento espectral de superfícies vegetais, pode-se encontrar variações nestas através de dados obtidos por sistemas sensores que podem indicar diferenças existentes nos alvos imageados. A seguir, serão levantados alguns trabalhos que demonstram esta variação mostrando alguns dos fatores que podem estar influenciando nas diferentes respostas espectrais tais como órgãos e tecidos de plantas (folhas), os dosséis vegetais.

Na figura 2 pode-se observar o comportamento típico da vegetação verde, vegetação em fase de senescência (vegetação não-fotossinteticamente ativa) e do solo na região do visível (VIS) ao infravermelho médio (IVM) do espectro eletromagnético.

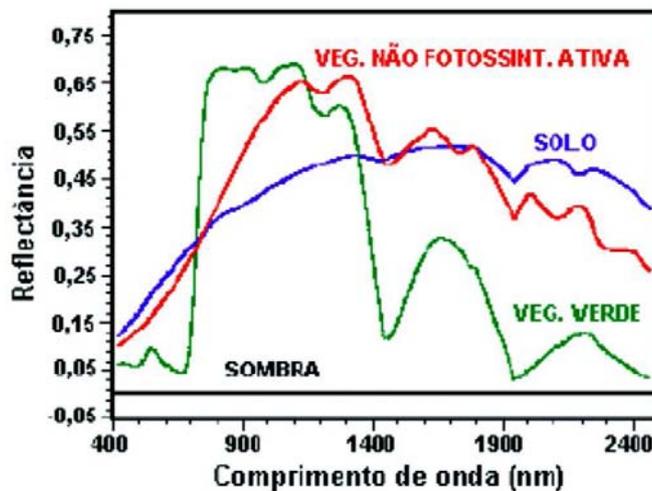


Figura 2 – Curvas espectrais da vegetação verde, solo e vegetação não-fotossinteticamente ativa, correspondentes a espectros de laboratório.

Fonte: MOREIRA (2000, p.33).

Analisando a figura 2, MOREIRA (2000) descreve o comportamento da vegetação não-fotossinteticamente ativa, à medida que a vegetação verde entra em processo de senescência, com a desidratação e a perda de pigmentos, a sua curva espectral é gradativamente modificada. A forte absorção no VIS é reduzida, com a perda de pigmentos, passando a apresentar maior reflectância. Nessa região a curva se apresenta mais suave e crescente, assemelhando-se ao perfil de resposta do solo. No infravermelho próximo (IVP), observa-se uma pequena redução na reflectância, motivada pela diminuição de espaços intercelulares, resultante do processo de desidratação. Finalmente, no IVM ocorre a diminuição da intensidade das feições de absorção causadas pela água líquida da matéria viva, também resultante da desidratação.

GAUSMAN (1985) comenta que além dos pigmentos, espaços ocupados pela água e ar e estruturas celulares do mesófilo das folhas, a energia refletida pelas folhas é afetada, também, pelo conteúdo de água, maturação ou idade da folha, a posição nodal, condição de iluminação (expostas ao sol ou constantemente à sombra), a pubescência e a senescência. Nesta mesma linha de pesquisa pode-se citar KNIPLING, 1970; GOEL, 1988 e ASNER, 1998, entre outros.

Através desta análise pode-se observar, considerando apenas o comportamento espectral de tecidos vegetais, a existência de variação na resposta espectral devido às

características fisiológicas e morfológicas resultantes dos diferentes estágios de desenvolvimento e condições agronômicas em que se desenvolvem os tecidos vegetais.

Segundo MOREIRA (2000), os valores de reflectância dependem das características particulares de cada espécie vegetal, além do estágio fenológico, aspectos sanitários e de condições adversas do clima (como secas e geadas). Pode-se afirmar, contudo, que em geral a vegetação verde sadia apresenta um comportamento muito próximo do padrão de resposta de suas folhas, o que não significa dizer que um dossel terá o mesmo comportamento espectral do tipo de folha que o compõe, quando estudada individualmente.

Em bases percentuais, a reflectância de um dossel é consideravelmente menor do que a de uma folha isolada (KNIPLING,1970). E ainda, segundo o mesmo autor, quando doenças ou estresses fisiológicos afetam as propriedades espectrais de folhas individuais, apesar de ocorrerem mudanças imediatas no VIS devido a sensibilidade da clorofila, a detecção de estresse não se baseia na mudança de folhas individuais, mas na redução de área foliar total exposta ao sensor.

EPIPHANIO et al. (1996) descrevem a complexidade da vegetação como alvo em sensoriamento remoto apresentando suas propriedades de reflexão foliar variadas numa mesma planta, seus múltiplos componentes refletoras, a não-uniformidade de estrutura inter e intraplantas, o substrato contínuo de solo e restos vegetais sobre o qual assenta-se, que por sua vez, apresentam propriedades de reflexão próprias. Além disso, no processo de medição da energia proveniente desse sistema, as configurações angulares do iluminante e dos instrumentos de medição contribuem para a modulação das propriedades de reflexão da vegetação.

Avaliando o comportamento de índices de vegetação na cultura de feijão, EPIPHANIO et al. (1996) observaram diferenças significativas nas respostas espectrais, em relação a variações de solos, para todos os estágios de desenvolvimento da cultura, concluindo que, mesmo em condições de elevada cobertura, há influência dos solos sobre os índices de vegetação. Enquanto que, para as variações dos fatores como ângulo de iluminação e ângulo de visada, houve, de uma maneira geral, diferenças significativas apenas nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura.

3.4. Aplicação de Sensoriamento Remoto na Agricultura

A partir do final da década de 60, o Brasil se capacitava para a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, restringindo-se, a princípio, na utilização de mapas sistemáticos para aposto identificação de feições específicas existentes na superfície terrestre. Com os avanços tecnológicos, em meados da década de 80, o lançamento do sensor Thematic Mapper (TM) a bordo do satélite Landsat-4 e posteriormente do Landsat-5, a resolução espacial mais fina e o maior número de faixas espectrais exploradas deste sensor em relação a seu antecessor MSS, abriram novas possibilidades de aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, incluindo não só os mapeamentos sistemáticos como também os estudos de quantificação de parâmetros biofísicos (biomassa vegetal), a que se pretende este trabalho, mediante o uso dos dados radiométricos existentes nas imagens geradas (MONTEIRO, 2001).

A opção de utilização de dados orbitais do sensor ETM⁺ do satélite Landsat em meio aos vários sensores existentes atualmente, se justifica para os fins a que destinam esta pesquisa, devido aos resultados obtidos por inúmeros trabalhos realizados com este e seus antecessores, os quais são citados a seguir, assim como a facilidade na aquisição destas imagens.

Atualmente, dentre suas diversas aplicações, pode-se ilustrar citando sua utilização no meio agrícola na discriminação de culturas agrícolas e suas respectivas áreas cultivadas (EPIPHANIO et. al., 1990; BATISTA et. al., 1990; TARDIN et. al., 1992), auxiliando no planejamento do uso e ocupação do solo (CAVALI, 1999; DONZELI et. al., 1992), no monitoramento de deficiências hídrica e nutricional (RIPPLE, 1986; DEMETRIADES-SHAH, 1987; HINZMAN, 1986; JOHNSON, 2001) e na estimativa de produtividade (PINTER et al., 1981; RUDORFF, 1985; RUDORFF e BATISTA, 1988).

Especificamente para a cultura da cana-de-açúcar, inúmeros trabalhos são encontrados na literatura utilizando dados espectrais, sendo que, os estudos desta natureza, em sua grande maioria, demonstram uma certa eficiência na identificação de áreas com cana-de-açúcar. Dentre eles pode-se citar MENDONÇA et al. (1989), através do projeto CANASATE, que estimou a área e distribuição da cana-de-açúcar, em escala nacional, utilizando-se de técnicas de sensoriamento remoto e obtendo em média 91% de precisão no levantamento.

JOAQUIM (1998) concluiu em seu trabalho que é possível identificar e separar três variedades de cana-de-açúcar, independentemente da textura do solo nos três primeiros cortes

utilizando as bandas 3, 4 e 5 do Landsat/TM, sendo recomendado apenas os dados do 1º e 2º corte para separação varietal. O autor atribui às características botânicas das variedades a responsabilidade pela diferenciação das respostas espectrais captadas pelo sensor.

Diferentemente das análises de caráter qualitativo (mapeamento de áreas), quando se analisam valores espectrais como medidas físicas de radiância ou reflectância em relação a propriedades biofísicas de sistemas vegetados, torna-se mais rigoroso o estudo e controle dos fatores que influenciam a resposta espectral (causadores de variação) de alvos agrícolas. Mesmo diante da complexidade destes fatores, pode-se observar na literatura bons resultados em inúmeros trabalhos desta natureza, dos quais alguns serão citados no decorrer deste trabalho.

Nas aplicações dos estudos acima mencionados, existem diversos produtos a serem obtidos com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto. EPIPHANIO et al. (1996) relata que as variáveis de sensoriamento remoto podem ser representadas de diversas formas, através de uma simples banda (exemplo vermelho ou infravermelho próximo), ou através do agrupamento das informações espectrais de cada banda individual de uma maneira específica, no que se denomina de índice de vegetação (IV) (WIEGAND et al., 1991).

Outros autores pesquisando modelos para estimativas de biomassa e produção, mostraram boas correlações entre variáveis biofísicas de várias culturas, inclusive de cana-de-açúcar, e variáveis espectrais (CLEVERS, 1988; WIEGAND et al., 1979; 1986a; 1986b; RUDORF e BATISTA, 1991 e PRICE e BAUSCH, 1995).

3.5. Índices de Vegetação

Os índices de vegetação (IVs), podem ser definidos como a combinação de duas ou mais bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de melhorar a relação desses dados com os parâmetros da vegetação. Para isso, podem ser utilizados os valores de dados espectrais de: voltagem de saída do sensor; radiância, número digital e reflectância. Empregam-se mais comumente valores de reflectância, devido às dificuldades em interpretar e obter os resultados das medidas calibradas com valores de voltagem de saída, número digital e radiância (MOREIRA, 2000).

Dentre os diversos agrupamentos existentes entre bandas (índices de vegetação) EPIPHANIO e FORMAGGIO (1991) destacam as razões, normalizações, distâncias no espaço cartesiano e suas variantes. Segundo estes autores, tais índices realçam o componente espectral

da vegetação e correlacionam-se com os parâmetros biofísicos da mesma, como biomassa, índice de área foliar (IAF) e percentagem de cobertura vegetal, entre outros.

Na literatura pode-se encontrar alguns trabalhos que utilizam ou apresentam os principais índices de vegetação tais como TUCKER, 1979; ANTUNES, 1993; RONDEAUX et al., 1996; MOREIRA 2000; PELLEGRINO, 2001.

Os primeiros trabalhos (JORDAN, 1969; PEARSON E MILLER, 1972) iniciaram com a utilização da razão simples entre bandas, no caso do infravermelho próximo (IVP) e vermelho (V) originando os índices de vegetação RATIO e RVI, dados pelas equações (1) e (2) respectivamente, onde se observava melhor correlação com a biomassa, realçando a resposta da vegetação.

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

$$RVI = \frac{V}{IVP} \quad (2)$$

Com o mesmo objetivo foi criado por ROUSE et al. (1973) o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação transformado (TVI), descrito pelas equações (3) e (4) respectivamente, na tentativa de amenizar as influências do solo, atmosfera e variações do ângulo do Sol.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (3)$$

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5} \quad (4)$$

RICHARDSON e WIEGAND (1977) propuseram o índice de vegetação perpendicular (PVI) dado pela equação (5), que representa, em um plano cartesiano V versus IVP, a distância perpendicular entre a reflectância de um dossel e a linha de solos, minimizando os efeitos da resposta espectral do solo subjacente na vegetação:

$$PVI = \frac{(IVP - a * V - b)}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (5)$$

onde: *a* e *b* são coeficientes da reta de solos.

Entre as variações do NDVI, surgiu o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) por HUETE (1988) dado pela equação (6), onde se objetivou diminuir o efeito do solo sobre diferentes densidades de cobertura vegetal, através do deslocamento do par ordenado V versus

IVP para o ponto de encontro da linha do solo com a linha da vegetação, pela adição de uma constante L .

$$SAVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V + L)}(1 + L) \quad (6)$$

Analisando diferentes valores para a constante L em diferentes densidades de vegetação e para dois tipos de solos (baixo e alto brilho), HUETE (1988) observou, de maneira geral, que aumentando o IAF (índice de área foliar) o valor de L deve ser diminuído gradativamente, até que, atingindo um IAF próximo a 3,6, a menor influência do solo ocorrerá com o $L=0$, quando o SAVI equivale ao NDVI. Atribui-se $L=0,5$ como um valor de redução considerável do ruído do solo para uma variada gama de densidades de dosséis.

Com os mesmos objetivos acima descritos, foi desenvolvido o índice de vegetação transformado e ajustado ao solo (TSAVI) dado pela equação (7), sendo uma medida do ângulo entre a linha de solo e a linha de vegetação (BARET et al., 1989; BARET e GUYOT, 1991).

$$TSAVI = \frac{a * (IVP - a) * (V - b)}{(V) + (a * IVP) - (a * b)} \quad (7)$$

sendo: a e b a inclinação e o intercepto da linha de solo no par ordenado IVP versus V .

CLEVERS (1989) descreve o índice denominado índice de vegetação por diferença ponderada (WDVI) dado pela equação (8).

$$WDVI = IVP - a * V \quad (8)$$

sendo: a a inclinação da reta do solo.

QI et al. (1994) propuseram alterações no cálculo do fator L do SAVI dado pela equação (10), de onde originou o índice de vegetação modificado e ajustado ao solo (MSAVI) descrito na equação (9).

$$MSAVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V + L)}(1 + L) \quad (9)$$

onde:

$$L = 1 - 2 * a * NDVI * WDVI \quad (10)$$

sendo: a a inclinação da reta do solo.

Buscando reduzir a dependência do NDVI às propriedades atmosféricas, KAUFMAN e TANRÉ (1992) propuseram uma modificação na formulação do índice conforme descrito na equação (11), introduzindo a informação atmosférica contida na banda azul.

$$ARVI = \frac{IVP - [V - \gamma(B - V)]}{IVP + [V - \gamma(B - V)]} \quad (11)$$

onde: γ é o parâmetro que controla a correção atmosférica e depende do tipo de aerossol, sendo utilizado $\gamma = 1$ quando o modelo do aerossol não é avaliado;

B representa a resposta do azul.

O mesmo conceito de redução dos efeitos atmosféricos aplicados no ARVI foi aplicado por GITELSON et al. (1996) enfatizando o uso do canal verde (VD), obtendo-se o índice verde de resistência atmosférica (GARI) e o índice verde-vermelho de resistência atmosférica (GRARI) dados pelas equações (12) e (13).

$$GARI = \frac{IVP - [VD - \lambda(B - V)]}{IVP + [VD - \lambda(B - V)]} \quad (12)$$

$$GRARI = \frac{IVP - [\eta VD + (1 - \eta)V - \lambda(B - V)]}{IVP + [\eta VD + (1 - \eta)V - \lambda(B - V)]} \quad (13)$$

onde: λ é o parâmetro que controla a correção atmosférica, empiricamente pode ser utilizado como 1;

η é uma mistura dentro do GRARI da reflectância correspondente ao comprimento de onda do verde e do vermelho na seqüência para obter propriedades que estão entre o ARVI e GARI.

Entre os índices utilizados por GITELSON et al. (1996), é importante citar o índice de vegetação diferença normalizada verde (“Green”NDVI) dado pela equação (14). Neste estudo representaremos este índice pela sigla GNDVI.

$$"Green" NDVI = \frac{IVP - VD}{IVP + VD} \quad (14)$$

Em uma abordagem diferente podemos citar os índices resultantes da transformação ortogonal “Tasseled Cap”. Estes índices utilizam as seis bandas não-termais do sensor TM e atribui pesos diferentes para cada uma delas através de equações lineares. Como resultado, são geradas três imagens-síntese: “brightness”, “greenness” e “wetness” (CRIST e CICONI, 1984). A imagem “greenness” ou índice de vegetação GVI é obtido de acordo com a equação (15):

$$GVI = -0,24717 * TM1 - 0,16263 * TM2 - 0,40639 * TM3 + 0,85468 * TM4 + 0,05493 * TM5 - 0,11749 * TM7 \quad (15)$$

onde: TM representa os canais do sensor Thematic Mapper do satélite Landsat.

Dentre os exemplos de aplicação dos índices de vegetação, pode-se encontrar no trabalho de HUETE (1988), que investigou a influência dos solos sobre os índices de vegetação, uma boa correlação dos índices NDVI e SAVI, com o IAF em culturas de algodão e com a biomassa em gramíneas.

De acordo com sua sensibilidade em relação às variáveis da vegetação, os índices de vegetação podem realçar a variação espacial existente, como nos mostra GITELSON et al. (1996) analisando-se o coeficiente de variação dos índices NDVI, ARVI, GARI e GRARI de folhas de bordo e castanha da Índia com uma variação da concentração de clorofila-A de $5\mu\text{g}/\text{cm}^2$ a $44,8\mu\text{g}/\text{cm}^2$, onde foi observado que a sensibilidade do GARI e GRARI foi três vezes superior ao ARVI e cinco vezes ao NDVI.

Utilizando-se imagens SPOT multiespectrais, STEVEN e MILLAR (1997) constataram que alguns índices específicos de monitoramento de culturas como NDVI (Índice de Vegetação Diferença Normalizada) apresentaram elevadas correlações com a produtividade de trigo ($r^2=0,774$), superiores aos apresentados pelas bandas separadamente e explicou 60% da variância nos dados de produtividade. O trabalho permitiu com isso, observar a variação da produção no campo no mês de junho, escolhido por apresentar menor cobertura de nuvens e maior correlação entre nível de cinza e produtividade.

Em outro experimento, utilizando sensoriamento remoto não-orbital, DIKER et al. (1998) encontrou resultados indicando que o índice NRI (Nitrogen Reflectance Index) se correlacionou melhor com produtividade do que os índices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index). Os autores encontraram também boas correlações entre todos os índices e alguns parâmetros da planta medidos (Índice de área foliar, matéria seca). Dependendo do estágio da planta alguns dos índices apresentam melhores correlações que outros.

RUDORFF (1985) avaliou o uso potencial dos dados Landsat utilizando os índices de vegetação (RVI, DN, DDVI, TVI e TVI6) em conjunto com dados de um modelo agrometeorológico, para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar. Em seu trabalho, foram localizadas áreas canavieiras através de imagens de satélite, extraído-se os níveis de cinza que foram transformados em valores de reflectância e, em seguida, em índices de vegetação que deveriam expressar as condições de crescimento da cultura. Considerou que os

melhores resultados foram alcançados com o uso dos dois modelos estudados em conjunto (agrometeorológico e índice de vegetação).

Ambos os modelos de regressão linear explicaram juntos 56% da variação, enquanto analisados separadamente os modelos agrometeorológico e índice de vegetação explicaram respectivamente 38% e 32% da variação.

Em seu trabalho, RUDORFF (1985) demonstra o potencial de utilização dos dados do satélite Landsat para se estimar a produtividade, e ainda, quando considera preliminar o modelo proposto em seu trabalho, justifica a elaboração de outros estudos.

3.6. Correção Atmosférica

Diante da importância da precisão no valor de reflectância e radiância das superfícies imageadas por um sensor remoto orbital e da influência da atmosfera nesta resposta espectral, faz-se necessário o conhecimento dos componentes atmosféricos que interferem neste processo.

Entre os principais efeitos observados nas imagens de satélite, devido à presença real da atmosfera entre o satélite e a superfície terrestre, podemos citar a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor que resulta na diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração do brilho de cada ponto da imagem. Os gases (principalmente vapor d'água, oxigênio e dióxido de carbono) e os aerossóis (pequenas partículas em suspensão) refletem, refratam, absorvem e espalham a radiação desde quando ela atinge a atmosfera até quando a deixa, depois de refletida pelo solo (ZULLO JR., 1994).

Com o objetivo de remover os efeitos atmosféricos de imagem de sensoriamento remoto ZULLO JR. (1994) desenvolveu um sistema computacional denominado de **Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélite (SCORADIS)** baseado na teoria e os parâmetros atmosféricos calculados pelo **MODELO 5S (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solarie)**.

Aplicando a correção atmosférica em algumas superfícies de imagens Landsat através do sistema SCORADIS, ZULLO JR. (1994) observou que os valores do NDVI, de uma maneira geral, são subestimados devido à presença da atmosfera. Em uma área de cana foi observado valor do NDVI de 0,6 na imagem corrigida e 0,4 na imagem original. Considerando a relação entre o NDVI e biomassa encontrada em Tucker (1979), corresponderiam a

627,30g.m² e 261,09g.m² de biomassa respectivamente, onde a diferença no NDVI de 0,2 corresponderia a um acréscimo de 140% de biomassa estimada devido a correção atmosférica.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho representa uma etapa dos estudos realizados pelo Grupo de Estudos em Geoprocessamento da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em parceria com a Usina São João Açúcar e Álcool S.A, localizada no município de Araras – SP, com o apoio da Fundação de Auxílio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

O experimento foi conduzido nos talhões de cana-de-açúcar pertencentes à Usina São João Açúcar e Álcool S.A, uma das maiores empresas do setor sucroalcooleiro.

4.1. Área de Estudo

A área de estudo está localizada no estado de São Paulo entre as coordenadas 47°22'10'' e 47°29'40'' Oeste e 22°11'45'' e 22°26'07'' Sul e se refere, das plantações com a cultura da cana-de-açúcar da usina São João, às pertencentes aos municípios de Araras, Leme e Rio Claro.

A figura 3 mostra a localização geográfica da área de estudo, enquanto na figura 4 pode-se observar em uma imagem de satélite (Landsat-7) a distribuição espacial dos talhões a serem analisados (em amarelo).

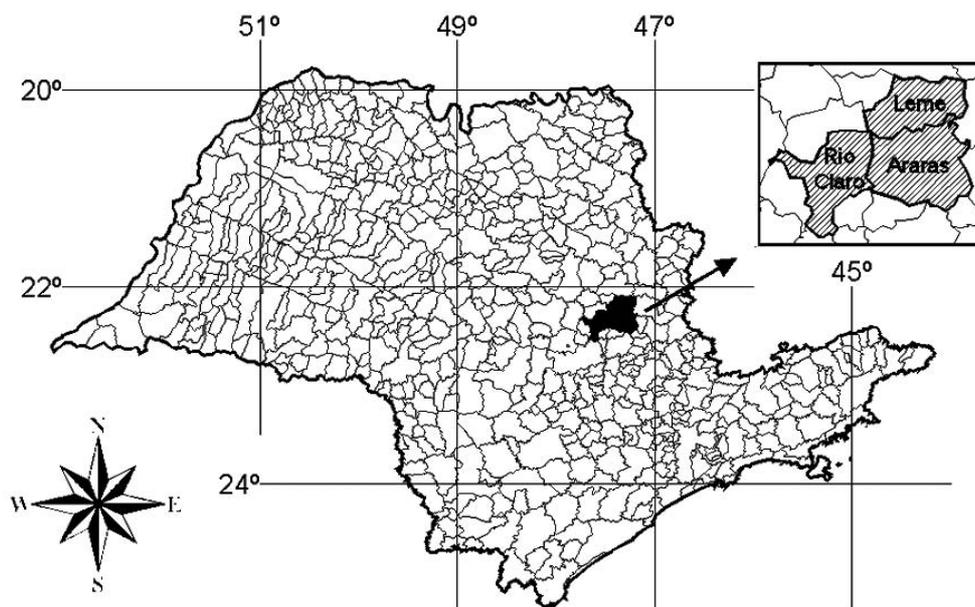


Figura 3 – Localização da área de estudo (município de Araras, Leme e Rio Claro) no Estado de São Paulo.

Dentre os fatores técnicos que influenciaram na escolha da área de estudo citar-se a disponibilidade de informações referentes aos tratos culturais, controle rigoroso dos dados de produção e de estimativa de produtividade além da disponibilidade técnica para aplicação de determinadas práticas de coleta de dados.

Composição Colorida RGB453

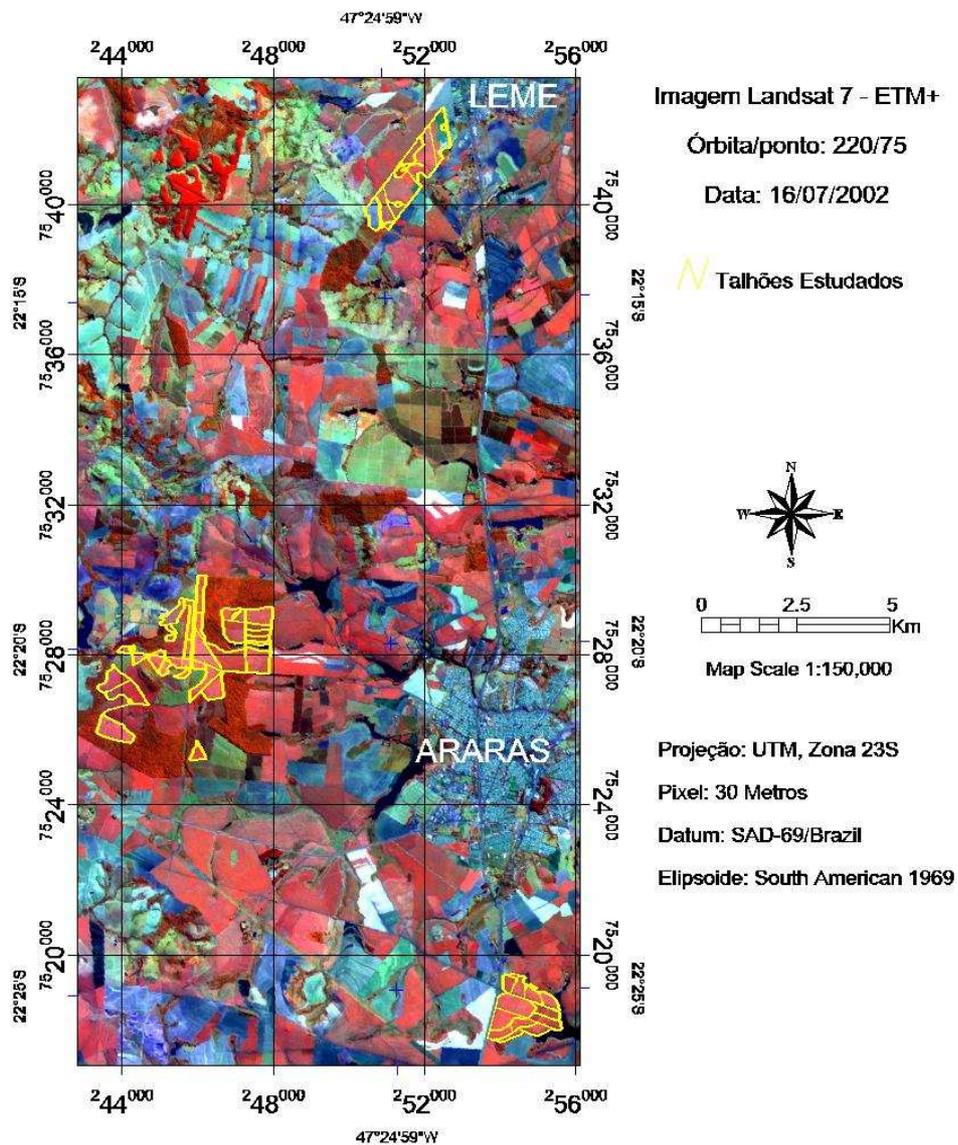


Figura 4 – Distribuição espacial dos talhões estudados (em amarelo), pertencentes à Usina São João Açúcar e Álcool.

4.2. Dados Espectrais

As informações espectrais foram extraídas de imagens orbitais, pertencentes à órbita/ponto 220/75, do satélite Landsat 7 sensor ETM⁺ referentes a quatro passagens (23/03/2001, 02/11/2001, 27/04/2002 e 16/07/2002) coincidentes com o período que antecede a colheita (maturidade fisiológica). De acordo com os trabalhos realizados anteriormente, onde RUDORFF (1985) concluiu que a época mais propícia de aquisição de dados Landsat para o estabelecimento de um modelo de produtividade para a cana-de-açúcar encontra-se próximo ao mês de fevereiro, 1 a 2 meses antes do início da colheita. E ainda, JOAQUIM (1998) que utilizou imagens Landsat adquiridas no mês de abril devido a cultura estar próxima ao seu máximo desenvolvimento vegetativo e antes do início da colheita.

O sensor ETM⁺ do satélite Landsat-7 apresenta as seguintes características: resolução radiométrica de 8 bits (256 níveis de cinza); resolução temporal de 169 dias, e características espectrais e espaciais segundo a tabela 1. Outro ponto importante a ser citado a respeito deste sensor diz respeito ao ângulo de visada, que se encontra no nadir (0°).

Tabela 1: Características espectrais e espaciais do sensor ETM⁺ do Landsat-7

| BANDA | FAIXA ESPECTRAL | | REGIÃO DO ESPECTRO | RESOLUÇÃO ESPACIAL |
|---------|-----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| | (nm) | (μ m) | | (m x m) |
| 1 | 450 a 520 | 0,45 a 0,52 | AZUL | 30 |
| 2 | 530 a 610 | 0,53 a 0,61 | VERDE | 30 |
| 3 | 630 a 690 | 0,63 a 0,69 | VERMELHO | 30 |
| 4 | 780 a 900 | 0,76 a 0,90 | IV/PRÓXIMO | 30 |
| 5 | 1550 a 1750 | 1,55 a 1,75 | IV/MÉDIO | 30 |
| 6 | 10400 a 12500 | 10,4 a 12,5 | IV/TERMAL | 120 |
| 7 | 2090 a 2350 | 2,09 a 2,35 | IV/MÉDIO | 30 |
| 8 (PAN) | 520 a 900 | 0,52 a 0,90 | VIS/IVPRÓXIMO | 15 |

Fonte: NASA (National Aeronautics and Space Administration).

4.3. Material

A informações cartográficas foram obtidas de cartas topográficas na escala 1:50.000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), das folhas de Rio Claro, Corumbataí, Araras, Leme, Conchal e Rio Capetinga e de mapas planialtimétricos em formato digital referente à área de cada talhão, derivados de levantamentos topográficos realizados pela usina.

O banco de dados utilizado foi fornecido pela Usina São João, contendo informações, como: área, variedade, estágio de corte, ambiente de solo, data de plantio, último corte, produtividade anterior, produtividade estimada e produção de cada talhão.

Como exemplo dos dados obtidos da usina, são mostradas na tabela 2 as informações dos talhões pertencentes à zona 11004 da fazenda São João dos quais foram escolhidos, no primeiro ano de estudo, os talhões 5 e 6.

Para a coleta de dados no campo foram utilizados um aparelho GPS (Sistema de Posicionamento Global por Satélite) Trimble modelo Geoexplorer 3 e um radiômetro solar CIMEL-317.

Para processamento das imagens e manipulações dos dados foram utilizados os seguintes softwares: IDRISI 32, ENVI 3.2, Auto Cad 2000, Microsoft Excel e Microsoft Access, entre outros.

Tabela 2: Dados utilizados para escolha e análise dos talhões em estudo.

| Acompanhamento de Safra | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------|---------|--------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|--------------|---------|-------------------------|--------|
| Extrato por talhões | | | | | | | | | | | | | |
| Safra | Fazenda | Zona | Talhão | Ambiente de Solo | Estágio de Corte | Área Total (ha) | Variedade de Cana | Plantio | Data Último Corte | Produção (t) | | Produtividade (t/ha) | |
| | | | | | | | | | | Estimada | Real | Estimada | Real |
| 2001/2002 | 11 -SÃO JOÃO | 11-0004 | 1 | A | 3° CORTE | 0,77 | SP80-1816 | 15/jan/97 | 14/nov/01 | 77,00 | 48,52 | 100,00 | 63,00 |
| | | | 2 | A | 4° CORTE | 13,93 | | | 01/nov/01 | 1393,00 | 976,20 | 100,00 | 70,10 |
| | | | 3 | A | 4° CORTE | 13,81 | | | 01/nov/01 | 1381,00 | 1768,81 | 100,00 | 128,10 |
| | | | 4 | A | 4° CORTE | 14,05 | | | 02/nov/01 | 1265,00 | 1464,01 | 90,00 | 104,20 |
| | | | 5* | B | 4° CORTE | 40,61 | | | 05/nov/01 | 4061,00 | 3772,31 | 100,00 | 92,90 |
| | | | 6* | B | 4° CORTE | 25,42 | | | 05/nov/01 | 2542,00 | 2206,66 | 100,00 | 86,80 |

Fonte: Usina São João Açúcar e Álcool.

* talhões escolhidos para distribuição dos pontos de amostragem da produtividade.

4.4. Metodologia

As aquisições de informações espectrais foram planejadas de modo a coincidir com as datas de passagens do satélite, devido à necessidade de se coletar dados referentes à radiação direta emitida pelo sol no momento da sua passagem para correção atmosférica das imagens. A figura 5 apresenta a metodologia utilizada sob a forma de fluxograma.

É importante ressaltar que as etapas metodológicas referentes ao processamento das imagens descritas a seguir foram realizadas nas quatro imagens orbitais adquiridas em duas safras agrícolas (2000/2001 e 2001/2002).

4.4.1. Correção atmosférica das imagens

Com o objetivo de melhorar a qualidade das imagens, foi utilizado o sistema de correção radiométrica de imagens de satélite (SCORADIS), desenvolvido por ZULLO JR. (1994), que estima o sinal recebido pelo satélite sem a interferência de fatores atmosféricos como gases e aerossóis.

A seguir se encontra uma breve descrição da metodologia de correção atmosférica utilizada neste estudo, desenvolvida por ZULLO JR. (1994) e descrita por PELLEGRINO (2001).

Para execução do algoritmo de correção do SCORADIS, para imagens dos sensores ETM⁺ do satélite Landsat-7, foram necessários os seguintes dados de entrada:

- Localização geográfica (Latitude e Longitude);
- Data, hora;
- Tipo e quantidade de aerossóis presentes;
- Modelo atmosférico dos componentes gasosos, principalmente vapor d'água e ozônio, que serão calculados com base na pressão atmosférica, temperatura e radiação direta incidente.

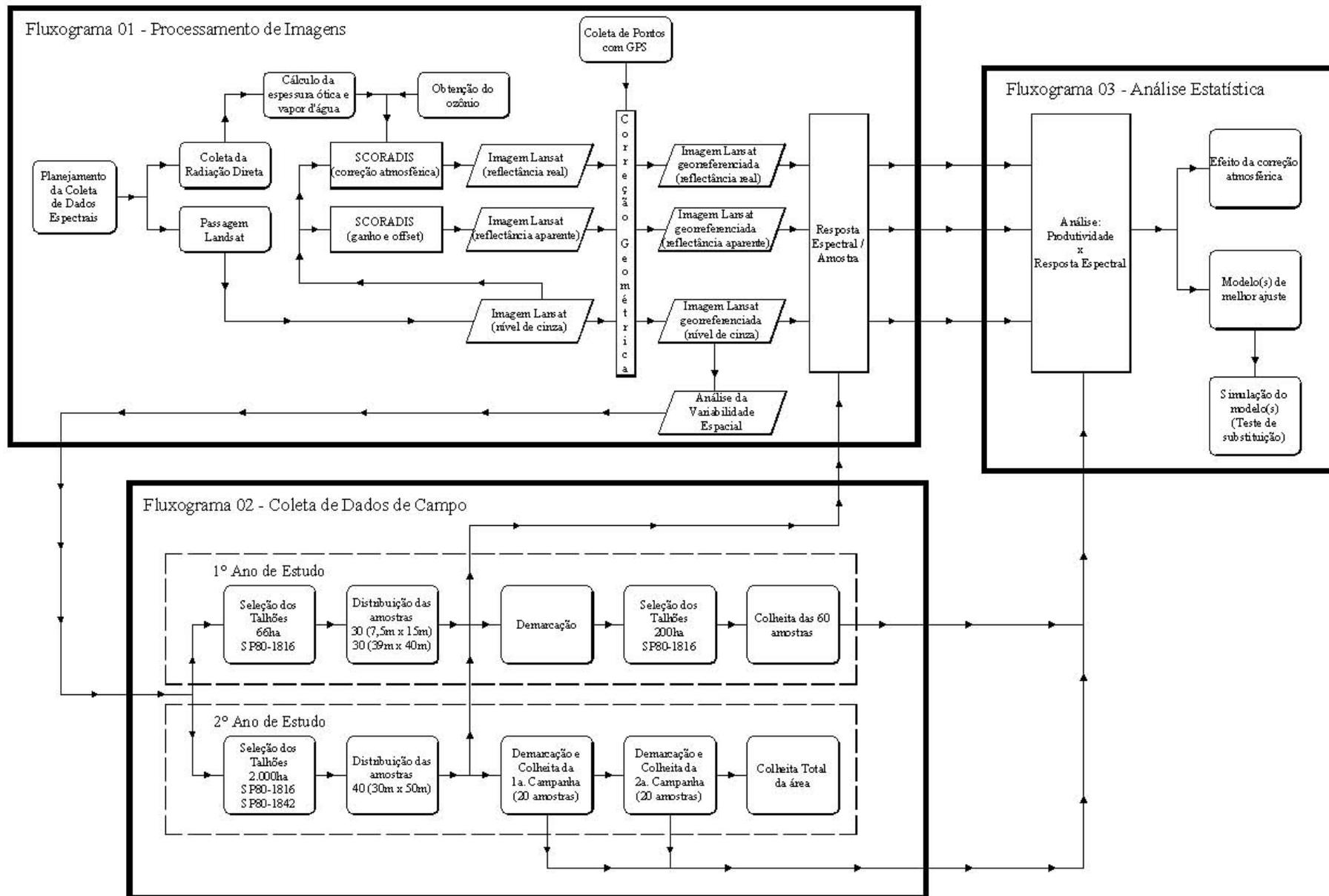


Figura 5 – Fluxograma da metodologia utilizada.

Considerando o efeito da atmosfera (espalhamento e absorção) sobre a radiação que é captada pelo sensor, o modelo fez a correção do nível de cinza da imagem e o cálculo da reflectância corrigida através dos seguintes passos:

- Com os dados de radiação direta, e baseado no trabalho de ZULLO JR. (1994), foi calculado o conteúdo de vapor d'água da atmosfera;
- A quantidade de ozônio foi avaliada por dois métodos: por LONDON et al. (1976) e através do satélite "Earth Probe TOMS" (MCPETERS, 2002);
- Os dados acima foram utilizados no programa SCORADIS para o cálculo da transmitância global, para aerossol continental e superfície vegetal homogênea;
- Pelo método descrito por ZULLO JR. (1994), foi calculado o ângulo horário, a declinação e o ângulo zenital do Sol para se estimar a massa ótica atravessada pela radiação;
- Foi utilizada a transmitância gasosa global, a massa ótica e o fator de correção da constante solar, para se determinar a espessura ótica daquele dia, por meio de regressão linear;
- Os dados acima, foram inseridos no programa SCORADIS, para processar as imagens e calcular a reflectância real da superfície.

Os dados referentes à radiação direta foram obtidos utilizando-se um radiômetro solar CIMEL-317. Suas medidas foram realizadas com o aparelho direcionado ao Sol, focalizando-o através de um tubo negro, evitando assim a entrada da radiação difusa (figura 6). Para a realização das medições foi necessária a determinação de um fator de calibração do aparelho, conforme o método da Curva de Langley, descrito por ZULLO JR. (1994), utilizado na regressão linear para a estimativa da espessura ótica, de acordo com os passos descritos anteriormente (PELLEGRINO, 2001).

Devido aos resultados encontrados nos trabalhos citados anteriormente, referentes à correção atmosférica de imagens de satélite, buscou-se neste estudo analisar a sua importância no processo de modelagem da biomassa em função de sua resposta espectral para as condições metodológicas aplicadas. Esta análise foi realizada através da caracterização das condições atmosféricas por meio de medidas de radiação direta e acompanhamento de suas variações em diferentes datas de passagem do satélite Landsat-7. Com o mesmo objetivo foi analisada a sua

interferência nos valores espectrais utilizados no processo de modelagem através da análise dos valores em nível de cinza, reflectância real e reflectância aparente.



Figura 6 – Obtenção da radiação direta com o radiômetro solar CIMEL-317, durante o período da passagem do satélite.

4.4.2. Correção geométrica das imagens

Após a correção dos efeitos atmosféricos, as imagens foram corrigidas a fim de que suas informações se tornassem geometricamente compatíveis com as informações advindas, em formato digital dxf (Drawing Exchange Format), do banco de dados da usina, sendo incorporadas a outros dados, em um SIG.

A correção geométrica foi realizada através da identificação de pontos comuns entre a imagem Landsat e o levantamento topográfico realizado pela usina como cruzamentos de drenagens, de estradas ou limites de talhões e carregadores existentes, transformando a imagem para um sistema de projeção e coordenadas geográficas por meio de um modelo matemático.

Como auxílio na coleta de pontos de controle, os pontos que não se encontraram na base cartográfica IBGE 1:50.000 foram obtidos com uso do aparelho GPS.

4.4.3. Resposta espectral

Para representar a resposta espectral da biomassa de um dossel de cana-de-açúcar e avaliar a sua correlação com a produtividade, foram utilizadas bandas referentes a faixa do

visível ao infravermelho médio (B1, B2, B3, B4, B5 e B7), e os seguintes índices de vegetação: RATIO, NDVI, TVI, SAVI, ARVI, GARI, GNDVI e GVI.

Devido à grande cobertura de vegetação existente no alvo em estudo, por se tratar da cultura da cana-de-açúcar próxima ao seu estágio de máximo desenvolvimento vegetativo tornou-se desnecessária a utilização dos índices de vegetação que consideram a distância ou o ângulo da reta de solo como o PVI, TSAVI, WdVI, MSAVI. Pode-se ainda considerar que a coleta da resposta espectral de solo exposto próximo à área de estudo não representaria uma possível influência das camadas inferiores do dossel em estudo por se encontrarem com uma grande quantidade de palha.

O trabalho foi realizado em duas safras agrícolas (2000/2001 e 2001/2002), onde a metodologia aplicada à coleta de dados foi sendo aperfeiçoada e se adaptadas às condições do estudo de acordo com os resultados obtidos e a disponibilidade de recursos.

Para melhor descrição, a seguir, a metodologia de coleta de dados será dividida em duas campanhas referentes às duas safras de estudo.

4.4.4. Primeiro ano de coleta de dados

O primeiro ano de estudo referente à safra 2000/2001 foi de fundamental importância para o desenvolvimento metodológico.

Em uma primeira etapa foram selecionados alguns talhões, levando em consideração a homogeneidade de determinados parâmetros da cultura como a representatividade da variedade na área da usina, estágio de corte, ambiente de solo, tipo de colheita, entre outros. Esta seleção foi realizada sob a orientação dos técnicos responsáveis da usina, onde se buscou iniciar os estudos com determinadas características e condições da cultura da cana-de-açúcar, estrategicamente mais importantes para o processo de estimativa da produtividade da usina.

Para coleta de dados espectrais foram utilizadas as imagens de 23/03/2001 e 02/11/2001. A variedade escolhida foi a SP 80-1816, estando no seu quarto ano de corte e sob as melhores condições de solo. As amostras foram distribuídas em dois talhões pertencentes à Zona 11004 da Fazenda São João, totalizando uma área de 66,03ha.

Distribuição espacial das amostras

Escolhida a área a ser estudada, utilizou-se alguns recursos do processamento de imagens (contrastes e aplicação de paletas de cores) para melhor visualização da variação

espacial, identificando os diferentes padrões de resposta espectral. Para isso, em uma primeira etapa, foi utilizada uma imagem referente à banda 4 (infravermelho próximo) e escolhida uma paleta de cores sobre a qual foram distribuídos 60 pontos de amostragem (figura 7) considerando a variação encontrada na resposta espectral, ou seja, quanto maior a variação maior o número de pontos.

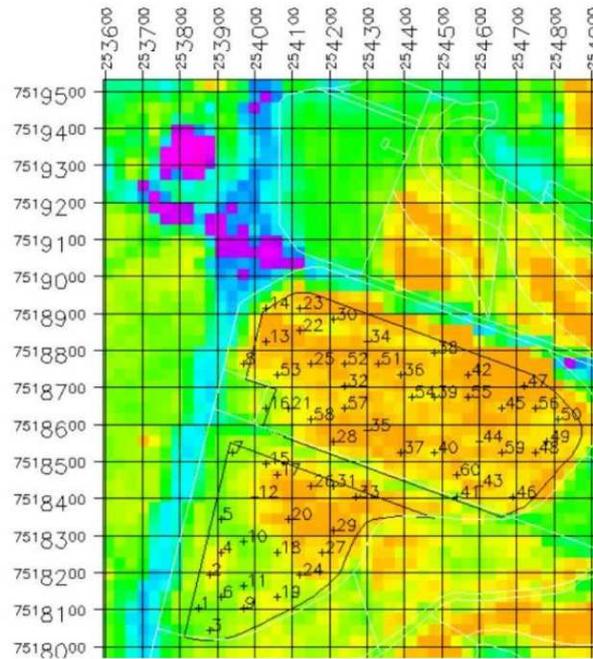


Figura 7 – Distribuição espacial das amostras sobre uma imagem referente a banda 4, considerando a variação espacial da cana-de-açúcar.

Metodologia para aquisição dos dados de produtividade

As amostras foram formadas por dois tipos de parcelas: uma de 5 linhas de 1,5m de largura por 15m de comprimento ($112,5m^2$), e outra formada por 26 linhas de 1,5m de largura por 40m de comprimento ($1560m^2$), buscando-se utilizar dimensões semelhantes a resolução espacial da imagem Landsat, na tentativa de se obter um valor de produção mais fiel à resposta espectral.

Escolhida previamente a localização geográfica de cada parcela através de seu ponto central e com o auxílio do aparelho GPS, foi realizado, dias antes da colheita, a localização de cada parcela para demarcação de seus limites através de um acero e estaqueamento de suas extremidades, como observado na figura 8. Através desta prática foi possível, no momento da

colheita, a identificação das parcelas pelo operador da colhedora, selecionando estas áreas para posterior colheita e pesagem individual.

O valor de produtividade foi obtido pela pesagem dos colmos colhidos, da mesma forma como é feito pela usina. Cada parcela foi cortada manualmente e carregada individualmente em caminhões que foram pesados no momento da entrada e saída no pátio da usina, obtendo-se desta forma o peso líquido da cana-de-açúcar colhida em cada parcela. A produção de cada amostra foi dividida pela área de sua respectiva parcela a fim de se obter sua produtividade.



Figura 8 – Detalhe de uma parcela demarcada para sua posterior avaliação.

Sabe-se que, para se correlacionar dados espectrais com medidas de biomassa da cana-de-açúcar, é importante um maior detalhamento das características do dossel, como realizado por PELLEGRINO (2001) por meio de medidas como índice de área foliar e peso de colmos, folhas e palha. No entanto, devido à grande quantidade de material a ser coletado e, por se tratar de uma área comercial, não foi possível a obtenção de medidas de palha e das folhas (ponteiro). Ao se utilizar apenas dos dados de produção dos colmos pretendeu-se facilitar a obtenção dos dados de amostragem, possibilitando o aumento no número de parcelas, e a área de cada parcela amostrada.

Precisão da localização, cálculo de área e representatividade espectral das amostras coletadas

Um cuidado especial foi dado à precisão da localização geográfica e à representatividade da resposta espectral para cada amostra analisada, ilustradas na figura 9.

Para melhor precisão na localização e auxílio na determinação da área de cada parcela, foram levantados com o aparelho GPS o ponto central e seus limites com precisão menor que 1m por meio de correção diferencial, sendo compatível com a precisão necessária para se trabalhar com dados Landsat (pixel de 30m x 30m). No entanto a precisão submétrica não é suficiente para pequenas áreas como é o caso das parcelas de 112,5m² e 1560 m².



Figura 9 – Localização e limitação das amostras e seleção dos pixels para análise da representatividade da resposta espectral.

A área de cada amostra foi calculada através das anotações do número de linha da cultura, considerando o espaçamento de 0,5m, e o seu comprimento médio. No entanto, devido a irregularidades nos limites e no formato das parcelas, a área obtida pelas anotações de campo foi comparada à área encontrada pelo levantamento com GPS, por meio da análise da variação entre estes valores em relação à média, eliminando-se, desta forma, as amostras que apresentavam coeficiente de variação superior a 10%.

Em relação à representatividade das informações espectrais, foi necessário a realização de uma análise estatística para cada amostra, utilizando-se uma janela de 2x2 pixels da imagem sobre cada ponto de amostragem. As amostras foram representadas pela média dos quatro pixels selecionados e através da análise do coeficiente de variação foi determinada a sua representatividade como padrão de resposta espectral eliminando as amostras que apresentaram valores superiores a 10% de variação nas principais bandas de estudo da superfície vegetal (banda 3, 4 e 5).

A utilização de um valor médio da resposta espectral e análise de sua variação auxiliou na eliminação das amostras representadas por pixels que se encontravam em uma região de transição entre os padrões de resposta espectral ou que estavam sofrendo interferência de outros alvos como falhas e carreadores.

Correlação entre os índices de vegetação e a produtividade

Após a seleção das amostras, foi realizada uma análise geral da correlação entre os dados de produtividade e seus respectivos valores espectrais obtidos nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 e por meio dos índices de vegetação: RATIO, NDVI, TVI, SAVI, ARVI, GARI, GNDVI e GVI. Esta análise foi aplicada nas duas imagens adquiridas em 23/03/2001 e 02/11/2001 e ainda considerando os valores em nível de cinza (NC), reflectância aparente e reflectância real. A correlação foi representada pelo coeficiente de determinação resultante da regressão linear entre a produtividade e sua resposta espectral.

4.4.5. Segundo ano de coleta de dados

A metodologia de coleta de dados de campo do segundo ano de estudo, referente à safra 2001/2002, sofreu algumas adaptações devido aos resultados e dificuldades experimentais encontradas no primeiro ano. Portanto, a descrição metodológica a seguir procurou dar ênfase às mudanças metodológicas realizadas.

Primeiramente, foi realizada uma seleção dos talhões que se apresentavam com as mesmas características do primeiro ano de estudo em relação a variedade, estágio de corte e ambiente de solo, de acordo com o banco de dados da usina.

Ao selecionar os talhões pertencentes as fazendas São José e Capitólio, que atendiam às características necessárias, observou-se, através da análise da variação da resposta espectral, a possibilidade de coleta de algumas amostras em outros talhões cultivados por outra

variedade e talhões que se apresentavam 2 meses e meio mais precoces em relação ao ciclo esperado da cultura. Apesar das diferenças, estas áreas foram amostradas com o objetivo de estudar o comportamento destas variações na relação entre a produtividade e sua resposta espectral. Para melhor representá-las, as amostras foram unidas em três grupos de acordo com a tabela 3.

Tabela 3: Descrição dos grupos de amostras analisadas no segundo ano.

| | Grupo | Nº amostras | Variedade | Estágio de Corte | Ambiente de Solo | Ciclo (meses) |
|-------------------|-------|-------------|-----------|------------------|------------------|---------------|
| Primeira Campanha | 1 | 5 | SP80-1842 | 4 Corte | A | 9 |
| | 2 | 11 | SP80-1816 | 4 Corte | A e B | 9 |
| | 3 | 4 | SP80-1816 | 5 Corte | B | 6 |
| Segunda Campanha | 1 | 4 | SP80-1842 | 4 Corte | A | 11,5 |
| | 2 | 12 | SP80-1816 | 4 Corte | A e B | 11,5 |
| | 3 | 4 | SP80-1816 | 5 Corte | B | 8,5 |

Distribuição espacial das amostras

Os pontos de amostragem foram distribuídos sobre uma área de 660ha que, por sua vez, foi superior à área analisada no primeiro ano. Este aumento deve-se à necessidade de se conhecer uma maior amplitude nos valores de produtividade e resposta espectral, promovendo um melhor ajuste dos dados analisados às variações da cultura encontradas no campo.

Os resultados obtidos no primeiro ano de estudo orientaram a escolha de novos períodos para o estudo da relação entre a biomassa e sua resposta espectral. Com isso, foram realizadas duas campanhas de coleta de dados de produtividade e resposta espectral. A 1ª campanha realizada em 27/04/2002 compreende o período em que a cultura se encontra em seu máximo desenvolvimento vegetativo, cerca de 2 a 3 meses antes da colheita. A 2ª campanha foi realizada no final do ciclo da cultura, de 2 a 5 dias antes da colheita. Desta forma, foi possível acompanhar a evolução da relação entre a produtividade e sua resposta espectral no período analisado.

A metodologia para distribuição dos pontos de amostragem no campo seguiu os mesmos critérios utilizados no primeiro ano, baseando-se na resposta espectral da banda 4. Uma vez que as variações encontradas nesta banda, referente ao infravermelho próximo do espectro eletromagnético, correspondem, em uma análise preliminar, à variação da biomassa

do dossel em estudo. No entanto, as amostras foram distribuídas aos pares de forma a representar os diferentes padrões de resposta espectral identificados na primeira imagem de 27/04/2002. Cada par de amostras representou o mesmo padrão de resposta espectral colhido em campanhas diferentes, onde uma primeira amostra foi colhida em 27/04/2002 e uma segunda colhida em 16/07/2002. Foram distribuídas um total de 40 amostras e colhidas 20 amostras por campanha.

Metodologia para aquisição dos dados de produtividade

A dificuldade de coleta de amostra no interior dos talhões fez com que as amostras de produtividade fossem coletadas próximas ao carreador. No entanto, para compensar o efeito de bordadura sofrido pelas plantas que se encontravam próximas ao carreador, a área amostral sofreu um aumento para as dimensões de 20 linhas, ou seja, 30m de largura por 50m de comprimento totalizando uma área de 1500m².

A cada campanha foi realizada a demarcação, corte manual, carregamento e pesagem de cada amostra. A figura 10 nos mostra o processo de carregamento de uma amostra e o detalhe de uma amostra colhida.



Figura 10 – Detalhe do carregamento de uma amostra e de uma amostra após a colheita.

Localização, cálculo de área e representatividade espectral

Foram utilizados os mesmos procedimentos para a localização e cálculo da área de cada amostra utilizadas no primeiro ano de estudo.

Em relação a coleta das informações espectrais, devido à maior distância entre as amostras, foi possível aplicar uma janela de 3x3 pixels e selecionar o pixel do centro para

representar a resposta espectral de uma determinada amostra. Como as amostras se localizavam próximas ao carreador, a seleção dos pixels foi realizada o mais próximo possível da área colhida, evitando-se os pixels que sofriam interferência do carreador.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Correção Atmosférica

Nesta etapa foi abordada a importância da utilização da radiação direta para correção dos efeitos dos componentes atmosféricos de imagem de satélite, por meio da análise destes valores sob diferentes condições atmosféricas, ressaltando que os dados analisados foram utilizados para correção atmosférica das imagens necessárias ao processo de modelagem da biomassa da cana-de-açúcar.

5.1.1. Estudo da variação dos parâmetros atmosféricos.

A figura 11 mostra a variação dos valores de radiação direta obtidas pelos diferentes filtros do radiômetro CIMEL em duas condições atmosféricas bem distintas. Em (a) pode-se observar uma maior variação e menor quantidade de radiação direta recebida nos cinco filtros do Cimel em relação a condição (b). A diferença entre estas medidas ocorre por a condição (a) representar uma atmosfera mais “carregada” ou “suja”, com uma maior concentração de aerossóis, devido à ocorrência de um longo período de estiagem (aproximadamente 2 meses). De forma contrária, a condição (b) representa uma atmosfera “limpa”, com uma menor concentração de aerossóis, devido à passagem de uma frente fria e ocorrência de precipitação 3 dias antes da coleta da radiação direta.

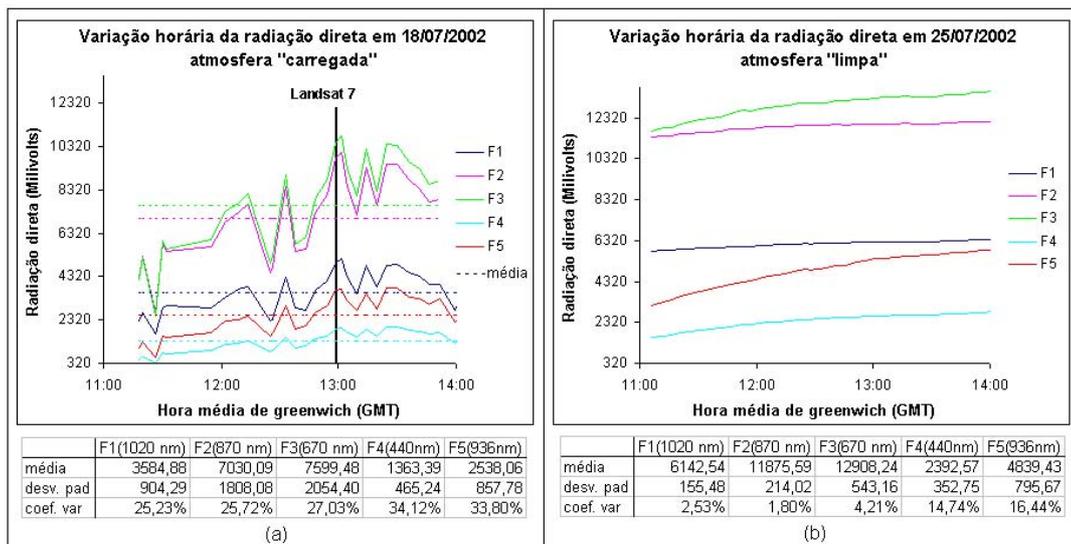


Figura 11 – Variação horária da radiação direta para duas condições atmosféricas.

Devido à maior variação encontrada em 18/07/2002, figura 11, pode-se observar uma diferença significativa entre a média utilizada para o cálculo da espessura ótica e os valores obtidos no momento da passagem do satélite (12:59GMT), subestimando a radiação solar de 28% a 31% para os diferentes filtros do Cimel.

Na figura 12 pode-se observar o comportamento da espessura ótica nos diferentes comprimentos de onda para as diversas datas de coleta de dados, mostrando a importância do conhecimento destes valores, utilizados, para a correção atmosférica. Os valores de espessura ótica utilizadas, no método de correção atmosférica são representados pelos pontos em 550nm e 936nm. A partir destes valores são determinadas, respectivamente, a quantidade de aerossóis e de vapor d'água da atmosfera.

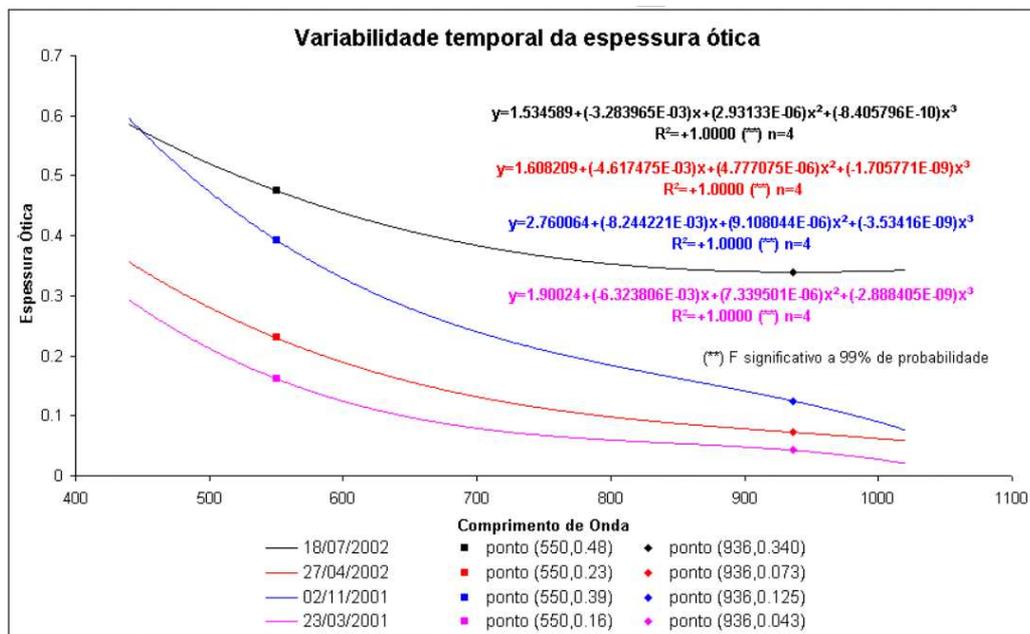


Figura 12 – Variação espectral da espessura ótica em diferentes datas.

A amplitude dos valores encontrados de espessura ótica (0,16 a 0,48 para 550nm e de 0,043 a 0,34 para 936nm) mostra a variação existente nas diferentes condições atmosféricas, ocorridas em 23/03/2001 e 18/07/2002, onde uma imagem adquirida em 18/07/2002 sofre maior influência da atmosfera devido à maior espessura ótica observada comparada à imagem de 23/03/2001.

A tabela 4, mais uma vez, confirma a variação nos valores calculados dos parâmetros atmosféricos necessários para correção atmosférica das imagens adquiridas.

Tabela 4: Parâmetros atmosféricos utilizados para correção das imagens Landsat.

| Data | Espessura ótica (550nm) | Conteúdo de vapor d'água (g/m ²) | Conteúdo de ozônio (cm/atm) |
|------------|-------------------------|--|-----------------------------|
| 23/03/2001 | 0,16 | 4,53 | 0,268 |
| 02/11/2001 | 0,39 | 4,16 | 0,259 |
| 27/04/2002 | 0,23 | 2,66 | 0,258 |
| 18/07/2002 | 0,48 | 1,81 | 0,259 |
| Média | 0,31 | 3,29 | 0,261 |
| Desv.pad. | 0,14 | 1,28 | 0,005 |
| Coef.var. | 45,99% | 38,77% | 1,80% |

ZULLO JR (1994) apresentou resultados semelhantes de espessura ótica atmosférica, com valores variando de 0,185 a 0,383, comprovando que os dados apresentam comportamento lógico de acordo com a evolução das condições meteorológicas, principalmente com relação a ocorrência de chuvas registradas nos dias anteriores. Assim como ZULLO JR (1994), foi observado que os menores valores refletiram as chuvas registradas nos dias anteriores e o aumento da espessura ótica estava de acordo com a ausência de chuvas em um determinado período.

Em relação aos valores de concentração de vapor d'água atmosférico pode-se observar uma relação inversa à espessura ótica, ou seja, quanto menor o período de ausência de chuvas e maior frequência de precipitações, maiores concentrações de vapor'água são encontradas na atmosfera. Analisando os valores apresentados na tabela 4, os maiores valores obtidos em 23/03 e 02/11/2001 representam o período de maior precipitação (período das águas), enquanto os menores valores se encontram no período de menor precipitação (período da seca) em 27/04 e 16/07/2002.

5.1.2. Correção atmosférica das imagens.

Em relação à análise visual das imagens Landsat-7 após a correção atmosférica foi constatado que as datas que possuem maiores valores de espessura ótica e concentração de vapor'água atmosféricos, caracterizando maior interferência atmosférica nos valores espectrais, apresentaram diferenças significativas na diferenciação das feições da superfície imageada.

Na figura 13 é mostrado a composição colorida de um recorte da imagem de 16/07/2002 com valores de reflectância aparente (sem correção atmosférica) e reflectância real (com correção atmosférica), em ambas imagens foi aplicado um realce linear. Para esta imagem, em particular, tendo em vista a indisponibilidade da coleta de dados de radiação direta no dia da passagem do satélite em 16/07/2002, foram considerados como parâmetros para correção atmosférica os valores medidos no segundo dia após a passagem (18/07/2002), visto que as condições atmosféricas permaneceram estáveis.

Devido ao alto valor de espessura ótica (0,48) em 18/07/2002, constatou-se uma melhoria significativa na diferenciação da cobertura vegetal imageada através do aumento da reflectância no infravermelho próximo, devido a correção do efeito de absorção dos gases, e a diminuição da reflectância nos canais do visível, devido a correção do efeito de espalhamento.

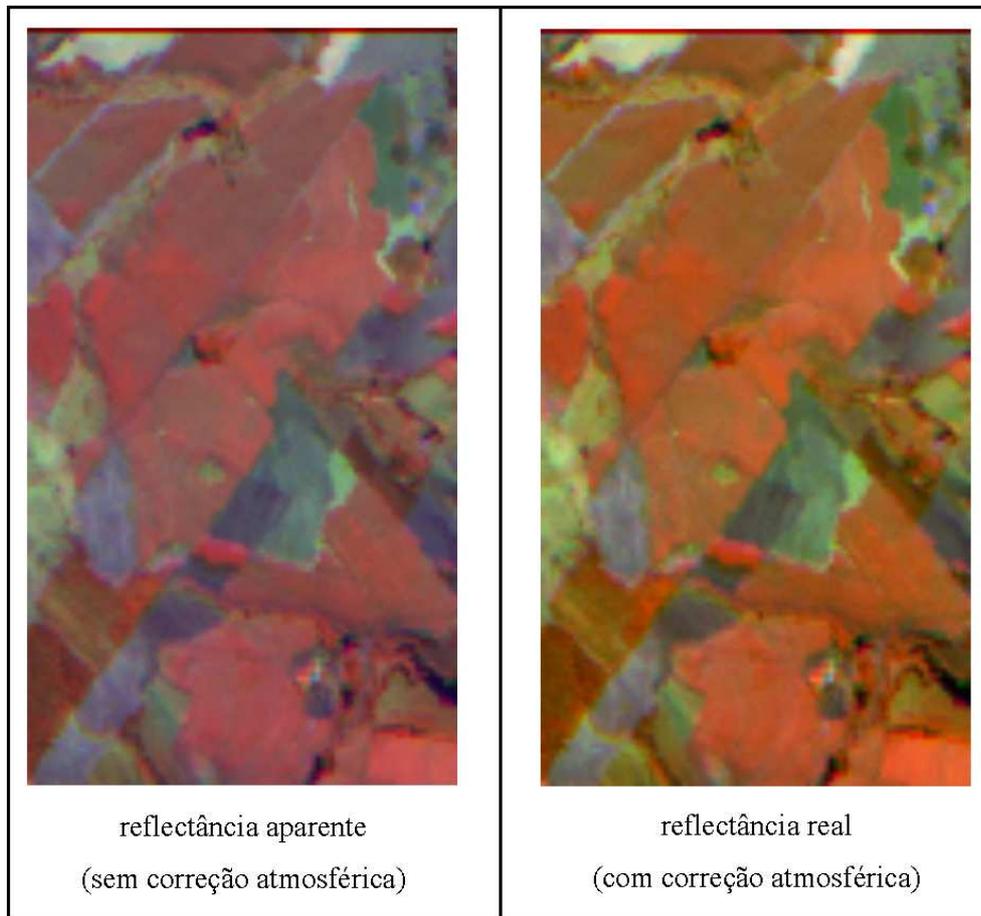


Figura 13 – Composição Colorida RGB 453 da imagem de 16/07/2002 sem e com correção atmosférica.

Resultados semelhantes aos apresentados anteriormente se encontram na figura 14, que mostra o comportamento espectral da média da reflectância real e aparente das amostras da cultura da cana-de-açúcar, na imagem de 27/04/2002 em relação ao comportamento padrão da vegetação verde e do solo apresentados por ROBERTS et al., 1997.

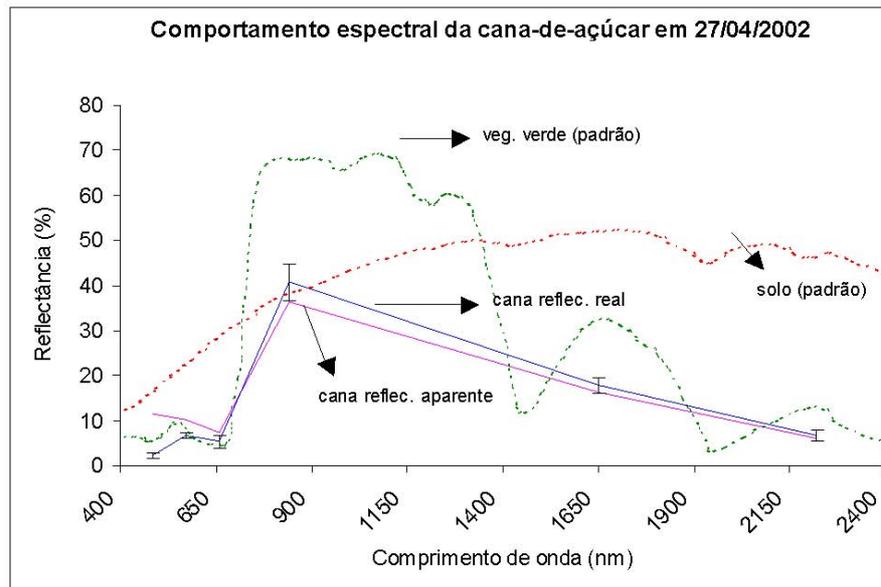


Figura 14 – Comportamento espectral da cana-de-açúcar em relação ao comportamento padrão da vegetação verde e do solo.

A diminuição da reflectância nos canais do visível, principalmente na faixa do azul, após a correção atmosférica mostrou-se eficiente na medida que a curva de reflectância real se ajustou ao padrão de resposta da vegetação verde apresentado em ROBERTS et al., 1997. Em relação ao canal espectral equivalente ao infravermelho próximo foi observado um aumento da reflectância que, apesar de apresentar comportamento semelhante, superou o padrão da vegetação verde, confirmando o alto vigor vegetativo da cultura da cana-de-açúcar.

5.2. Resultados do Primeiro Ano de Estudo

Das 60 amostras distribuídas no campo, 9 foram perdidas durante o processo de colheita, outras 4 amostras foram eliminadas por apresentarem uma variação superior a 10% na área entre os dados obtidos pelas anotações de campo e os dados do levantamento realizado com GPS. E ainda, 2 amostras foram eliminadas por apresentarem variação superior a 10% na média da resposta espectral da janela de 2x2 pixels. Um total de 45 amostras foram utilizadas nas análises dos dados de produtividade e resposta espectral do primeiro ano (Anexo 1).

5.2.1. Análise geral da relação entre a produtividade e os dados espectrais

A tabela 5 apresenta os valores do coeficiente de determinação (R^2) encontrados nas correlações entre os dados de produtividade e sua resposta espectral para as duas imagens adquiridas no primeiro ano de estudo. A resposta espectral foi representada pelos valores em nível de cinza (NC), reflectância aparente (Ref. ap) e reflectância real ou de superfície (Ref. real) para todas as bandas do satélite Landsat 7, com exceção do infravermelho termal, e para os diversos índices de vegetação.

Tabela 5 – Coeficientes de determinação obtidos nas correlações entre a produtividade e a resposta espectral.

| Resposta espectral | Coeficiente de determinação (R^2) | | | | | |
|--------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|----------------------|---------|-----------|
| | Imagem de 23/03/2001 | | | Imagem de 02/11/2001 | | |
| | NC | Ref. ap | Ref. real | NC | Ref. ap | Ref. real |
| Banda 1 | 0,1879 | 0,1475 | 0,1556 | 0,0923 | 0,1007 | 0,0738 |
| Banda 2 | 0,1788 | 0,0977 | 0,1182 | 0,0650 | 0,0572 | 0,0648 |
| Banda 3 | 0,3415 | 0,3697 | 0,3842 | 0,1959 | 0,1940 | 0,1659 |
| Banda 4 | 0,5155 | 0,5189 | 0,5160 | 0,0070 | 0,0108 | 0,0106 |
| Banda 5 | 0,3529 | 0,3485 | 0,3127 | 0,3369 | 0,3299 | 0,3399 |
| Banda 7 | 0,3372 | 0,3422 | 0,3253 | 0,3603 | 0,3649 | 0,3795 |
| RATIO | 0,4811 | 0,5017 | 0,4707 | 0,1371 | 0,1494 | 0,1384 |
| NDVI | 0,4770 | 0,5000 | 0,4709 | 0,1404 | 0,1528 | 0,1439 |
| TVI | 0,4763 | 0,4997 | 0,4708 | 0,1417 | 0,1536 | 0,1448 |
| SAVI | 0,4772 | 0,5016 | 0,4734 | 0,1403 | 0,1522 | 0,1432 |
| ARVI | 0,3477 | 0,3480 | 0,3968 | 0,1747 | 0,1739 | 0,1402 |
| GARI | 0,3925 | 0,3705 | 0,3837 | 0,1448 | 0,1429 | 0,1248 |
| GNDVI | 0,4967 | 0,4692 | 0,3877 | 0,0593 | 0,0812 | 0,0915 |
| GVI | 0,5190 | 0,5314 | 0,5266 | 0,1056 | 0,0922 | 0,0867 |

Obs.: Os valores em negrito destacam as melhores correlações encontradas.

Os dados da tabela 5 mostram, de modo geral, um maior coeficiente de determinação entre produtividade e resposta espectral para as condições da imagem de 23/03/2001. Exceção foi observada para as bandas 5 e 7 as quais apresentaram semelhanças de valores dos coeficientes de determinação para as duas datas estudadas (23/03/2001 e 02/11/2001).

Os valores de coeficiente de determinação não apresentaram diferenças significativas em relação a resposta espectral em NC, Ref. Ap e Ref. Real, mostrando com isso que a correção dos efeitos atmosféricos sobre a reflectância da cultura não influenciou a correlação entre a produtividade e sua resposta espectral.

Ao analisar os valores de R^2 obtidos nas amostras da imagem de 23/03/2001 observa-se maior correlação da produtividade com a resposta espectral da banda 4 referente ao infravermelho próximo (IVP) e com índice de vegetação GVI. Os índices de vegetação RATIO, NDVI, TVI, SAVI e GNDVI apresentaram valores semelhantes e superiores aos índices ARVI e GARI.

A figura 15 nos mostra os melhores resultados obtidos na relação entre a produtividade e sua resposta espectral no primeiro ano de estudo.

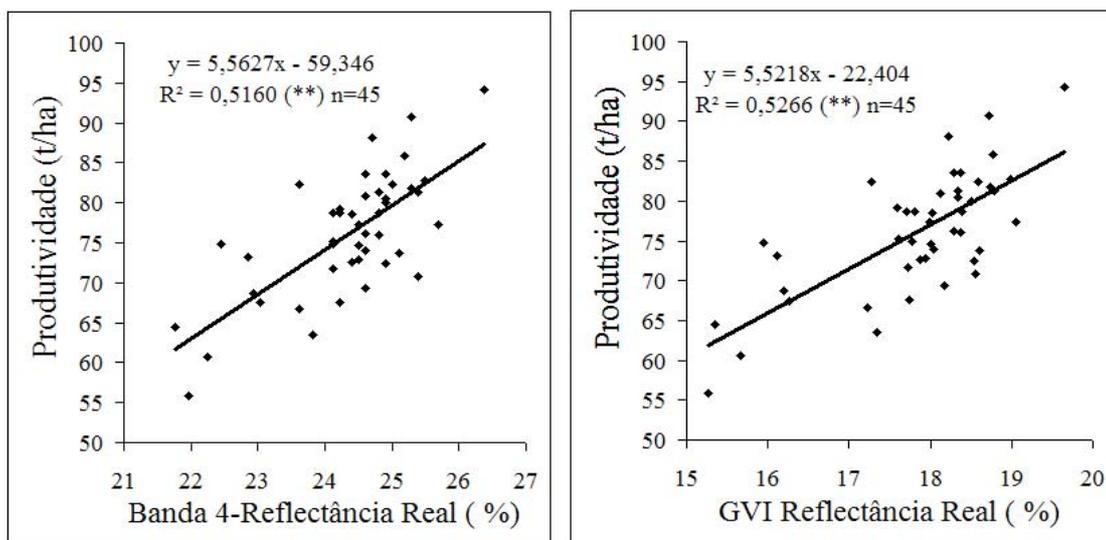


Figura 15 – Gráfico da equação de regressão entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI referentes à imagem de 23/03/2001.

Apesar de apresentar os melhores resultados, a resposta espectral da Banda 4 e do GVI explicaram 51,6% e 52,66% da variação da produtividade da cultura aos 150 dias em pleno estágio de crescimento vegetativo. Por isso, cabe ressaltar que, entre a resposta espectral de 23/03/2001 e a colheita em 02/11/2001 existe um período de 224 dias ou aproximadamente sete meses e meio. Estes resultados mostram que a resposta espectral da cultura da cana-de-açúcar aos 150 dias explicou boa parte da variação da produção colhida no final do seu ciclo.

No primeiro ano de estudo não foi possível encontrar altas correlações entre os dados de produtividade e a resposta espectral. No entanto, as dificuldades metodológicas encontradas nos trabalhos de campo aliada aos resultados obtidos foram fundamentais na consolidação da metodologia aplicada no segundo ano de estudo.

5.3. Resultados do Segundo Ano de Estudo

5.3.1. Análise geral da relação entre a produtividade e os dados espectrais

A tabela 6 apresenta os valores do coeficiente de determinação (R^2) encontrados nas correlações entre os dados de todas as amostras de produtividade e sua resposta espectral para as duas imagens adquiridas no segundo ano de estudo. A resposta espectral foi representada pelos valores em nível de cinza (NC), reflectância aparente (Ref. ap) e reflectância real ou de superfície (Ref. real), para todas as bandas do satélite Landsat 7, com exceção do infravermelho termal, e alguns índices de vegetação.

Analisando os valores de R^2 obtidos a partir das amostras da primeira campanha em 27/04/2002 observou-se maior correlação da produtividade com a resposta espectral da banda 4, referente ao infravermelho próximo (IVP), e ao índice de vegetação GVI. As bandas referentes ao visível (VS) e infravermelho médio (IVM) apresentaram os menores valores de correlação, seguidas dos demais índices de vegetação.

Comparando-se os valores do coeficiente de determinação entre as duas imagens adquiridas, pode-se observar que, em 27/04/2002 os dados de produtividade apresentaram melhor correlação com a resposta espectral. Esta maior correlação pode ser explicada devido ao estágio avançado de desenvolvimento vegetativo período em que a cultura se apresentava com uma alta atividade fotossintética, enquanto que em 16/07/2002 a cultura já se encontrava no final do ciclo, no estágio de maturação e senescência, com uma menor atividade fotossintética e, principalmente, devido ao acamamento e influência da palha, que promove variações na resposta espectral que não correspondem às variações de produtividade. PELLEGRINO (2001) constatou este comportamento ao analisar o coeficiente de variação de dados de reflectância de campo para a cultura da cana-de-açúcar, concluindo que a fase de senescência das folhas, quando ocorre o enchimento dos colmos, a quantidade de folhas verdes diminui e a palhada ou folhas secas tornam-se visíveis e passam a influenciar o valor de reflectância de superfície.

Tabela 6 – Coeficientes de determinação obtidos nas correlações entre a produtividade e a resposta espectral.

| Resposta espectral | Coeficiente de determinação (R ²) | | | | | |
|--------------------|---|---------------|---------------|----------------------|---------|-----------|
| | Imagem de 27/04/2002 | | | Imagem de 16/07/2002 | | |
| | NC | Ref. ap | Ref. real | NC | Ref. ap | Ref. real |
| Banda 1 | 0,0496 | 0,0527 | 0,0486 | 0,0912 | 0,0569 | ----- |
| Banda 2 | 0,0050 | 0,0099 | 0,0049 | 0,2202 | 0,2291 | 0,2202 |
| Banda 3 | 0,0725 | 0,0742 | 0,0607 | 0,1835 | 0,1646 | 0,2070 |
| Banda 4 | 0,5443 | 0,5376 | 0,5574 | 0,1454 | 0,1312 | 0,1403 |
| Banda 5 | 0,0373 | 0,0452 | 0,0401 | 0,1058 | 0,1135 | 0,1163 |
| Banda 7 | 0,1038 | 0,1357 | 0,1098 | 0,1777 | 0,1749 | 0,1936 |
| RATIO | 0,2778 | 0,2575 | 0,1720 | 0,0092 | 0,0057 | 0,0669 |
| NDVI | 0,2636 | 0,2390 | 0,1628 | 0,0083 | 0,0043 | 0,0656 |
| TVI | 0,2615 | 0,2376 | 0,1627 | 0,0080 | 0,0041 | 0,0656 |
| SAVI | 0,2641 | 0,2430 | 0,1675 | 0,0084 | 0,0052 | 0,0600 |
| ARVI | 0,1468 | 0,1239 | 0,1638 | 0,0189 | 0,0302 | 0,0657 |
| GARI | 0,1699 | 0,1427 | 0,1767 | 0,0181 | 0,0389 | 0,1026 |
| GNDVI | 0,3613 | 0,3251 | 0,1757 | 0,0190 | 0,0031 | 0,1290 |
| GVI | 0,4522 | 0,4775 | 0,4779 | 0,0774 | 0,0902 | 0,0967 |

Obs.: Os valores em negrito destacam as melhores correlações encontradas.

Analisando as melhores correlações encontradas na tabela 6 constatou-se que os valores de R² não diferem em relação aos dados de NC, Ref. ap e Ref. real. No entanto, alguns índices como o RATIO, NDVI, TVI e SAVI, apesar de apresentar em baixos valores, sofreram uma diminuição na correlação com os dados de Ref. real.

5.3.2. Comportamento da produtividade e sua resposta espectral entre as duas campanhas

A tabela 7 e a figura 16 mostram os valores de produtividade das amostras coletadas nas campanhas de 27/04/2002 e 16/07/2002, assim como sua resposta espectral na banda 4 e o índice GVI. Das respostas espectrais analisadas, a banda 4 e ao índice GVI foram os que melhor se correlacionaram com a produtividade, justificando a sua escolha na representação da resposta espectral das amostras.

A primeira coluna da tabela refere-se aos grupos formados pelas amostras que apresentam características semelhantes de acordo com a tabela 3.

Tabela 7– Dados de produtividade e sua resposta espectral referente às duas campanhas de 2002.

| 1ª Campanha (27/04/2002) | | | | | 2ª Campanha (16/07/2002) | | | | | Δ 2ª - 1ª Campanha* | | |
|--------------------------|---------|-----------------------|------|------|--------------------------|---------|-----------------------|------|------|-----------------------|------|------|
| grupo | amostra | prod. | B4 | GVI | grupo | amostra | prod. | B4 | GVI | prod. | B4 | GVI |
| | | (ton/ha) (ref.real %) | | | | | (ton/ha) (ref.real %) | | | (ton/ha) (ref.real %) | | |
| 1 | 1 | 69,1 | 31,8 | 23,3 | 1 | 21 | 71,8 | 28,6 | 21,6 | 2,7 | -3,1 | -1,7 |
| 1 | 2 | 55,7 | 29,8 | 21,4 | 1 | 22 | 61,2 | 28,2 | 21,8 | 5,5 | -1,6 | 0,5 |
| 1 | 3 | 91,2 | 37,6 | 28,3 | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| 1 | 4 | 62,6 | 32,2 | 22,8 | 1 | 23 | 79,6 | 29,8 | 22,9 | 17,0 | -2,4 | 0,1 |
| 1 | 5 | 63,6 | 32,5 | 23,0 | 1 | 24 | 80,0 | 31,8 | 24,1 | 16,4 | -0,8 | 1,1 |
| ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | 2 | 25 | 59,3 | 29,0 | 21,8 | ---- | ---- | ---- |
| 2 | 6 | 65,0 | 32,5 | 23,4 | 2 | 26 | 61,5 | 25,5 | 19,3 | -3,4 | -7,1 | -4,1 |
| 2 | 7 | 88,4 | 39,6 | 30,1 | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | 2 | 27 | 55,6 | 28,2 | 21,1 | ---- | ---- | ---- |
| 2 | 8 | 92,4 | 38,4 | 30,2 | 2 | 28 | 78,1 | 29,8 | 23,5 | -14,3 | -8,6 | -6,8 |
| 2 | 9 | 71,3 | 33,7 | 25,9 | 2 | 29 | 109,7 | 27,8 | 20,6 | 38,4 | -5,9 | -5,2 |
| 2 | 10 | 84,2 | 37,6 | 29,5 | 2 | 30 | 118,5 | 33,3 | 25,7 | 34,2 | -4,3 | -3,8 |
| 2 | 14 | 83,7 | 42,0 | 33,2 | 2 | 34 | 100,2 | 36,1 | 26,9 | 16,5 | -5,9 | -6,3 |
| 2 | 15 | 94,6 | 40,4 | 32,4 | 2 | 35 | 82,0 | 39,2 | 29,7 | -12,6 | -1,2 | -2,7 |
| 2 | 16 | 82,5 | 41,6 | 32,7 | 2 | 36 | 80,6 | 36,5 | 27,5 | -2,0 | -5,1 | -5,2 |
| 2 | 17 | 77,9 | 40,0 | 31,6 | 2 | 37 | 72,3 | 34,5 | 27,1 | -5,6 | -5,5 | -4,6 |
| 2 | 19 | 72,5 | 33,3 | 25,3 | 2 | 39 | 81,1 | 26,7 | 19,9 | 8,6 | -6,7 | -5,4 |
| 2 | 20 | 75,6 | 35,7 | 27,8 | 2 | 40 | 70,7 | 31,8 | 24,0 | -4,9 | -3,9 | -3,9 |
| 3 | 11 | 65,8 | 35,7 | 28,2 | 3 | 31 | 67,1 | 30,2 | 23,5 | 1,3 | -5,5 | -4,7 |
| 3 | 12 | 62,7 | 35,7 | 28,0 | 3 | 32 | 64,1 | 28,6 | 21,6 | 1,3 | -7,1 | -6,3 |
| 3 | 13 | 55,6 | 32,9 | 25,7 | 3 | 33 | 57,9 | 32,2 | 25,4 | 2,3 | -0,8 | -0,3 |
| 3 | 18 | 40,1 | 34,1 | 26,3 | 3 | 38 | 39,4 | 28,2 | 22,1 | -0,8 | -5,9 | -4,2 |
| média = | | 72,7 | 35,9 | 27,5 | média = | | 74,5 | 30,8 | 23,5 | 5,6 | -4,5 | -3,5 |
| desv.pad.= | | 14,3 | 3,6 | 3,6 | desv.pad.= | | 18,7 | 3,6 | 2,8 | 14,3 | 2,4 | 2,5 |

* Diferença entre os valores da 2ª para a 1ª Campanha

As amostras pertencentes a 1ª e 2ª campanhas que se encontram na mesma linha da tabela 7 buscam representar o comportamento da produtividade e da resposta espectral no intervalo entre estas datas, ou seja, do período anterior de 2 a 3 meses ao momento da colheita.

Uma vez que estas foram dispostas desta forma com o objetivo de representarem o mesmo padrão de resposta espectral na imagem adquirida na 1ª campanha, e, teoricamente o mesmo padrão de produtividade, fazendo com que o padrão de resposta encontrado no período anterior a colheita viesse a ser analisado no final do ciclo da cultura, a fim de se conhecer a evolução da produtividade e sua resposta espectral neste período.

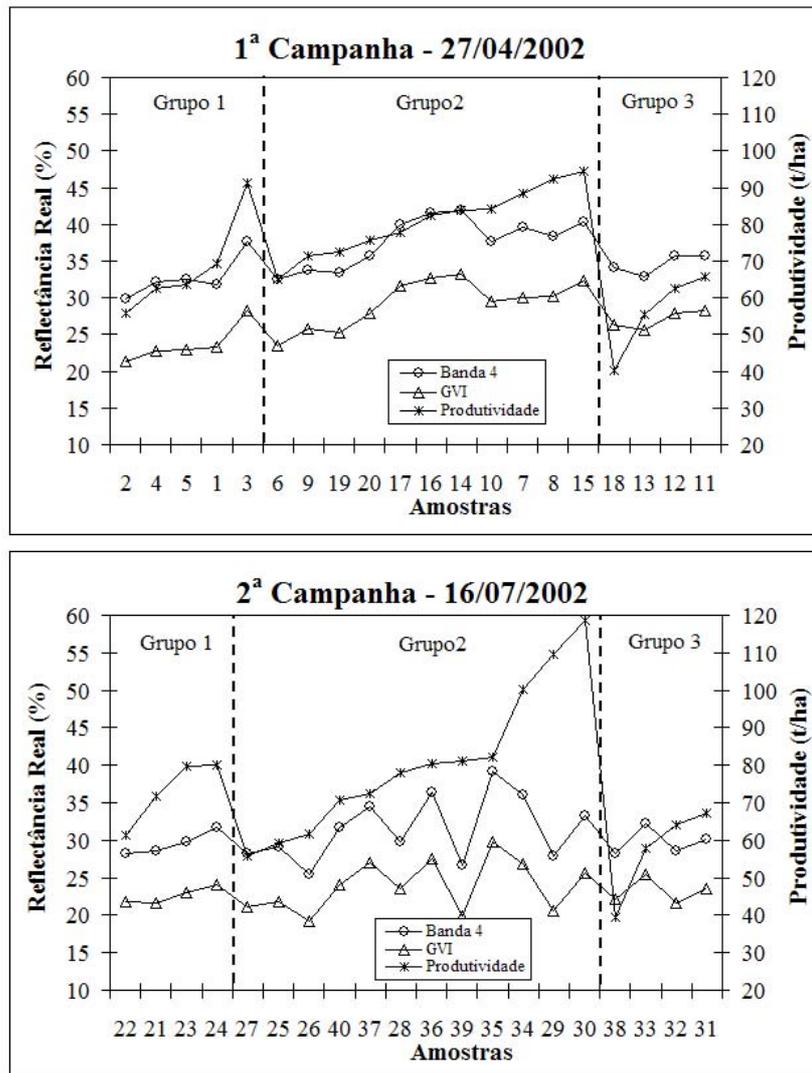


Figura 16 – Comportamento dos dados de produtividade e da resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI nas diversas amostras pertencentes às duas campanhas realizadas.

A ocorrência de amostras que não se relacionaram entre as campanhas, como o caso da amostra 3 na 1ª campanha, se deve à perda ocasionada por incêndios criminosos em alguns pontos dos talhões analisados fazendo com que sua colheita fosse antecipada.

Através dos valores apresentados na tabela 7 e na figura 16 buscou-se estudar as mudanças ocorridas no comportamento da produtividade e sua resposta espectral do período de máximo desenvolvimento vegetativo (1ª campanha) à maturação e colheita (2ª campanha). No entanto, os valores do delta (Δ) de produtividade encontrados entre as duas campanhas apresentaram uma grande variação entre valores negativos e positivos. Estes resultados mostram que não foi possível representar o mesmo padrão de resposta espectral e, teoricamente, o mesmo padrão de produtividade nos pares de amostras colhidos nas duas campanhas. Diante destes resultados levantaram-se algumas hipóteses que podem ajudar na sua explicação.

A grande variação natural presente na cultura da cana-de-açúcar foi a primeira hipótese levantada. PIEROSSO e NEVES (2000), estudando a variação da produtividade da cana-de-açúcar, em duas áreas de 1,4ha e 1,8ha, na Usina São Martinho, com as variedades RB 83-5089 e RB 80-6043, no 3º e 4º corte respectivamente, observaram variações na produtividade de 20t/ha a 140 t/ha. Embora os autores ressaltem que os valores muito baixos e muito altos na produtividade foram devido a impactos do elevador da colhedora na caçamba instrumentada que pesava os dados, a cana-de-açúcar na área estudada apresentou alta variação espacial na produtividade.

Uma outra justificativa para os resultados de produtividade encontrados nas campanhas deste 2º ano de estudo se baseia na influência da bordadura, uma vez que as amostras foram colhidas próximo aos carregadores. Este procedimento, por ser uma necessidade operacional, determinou a não possibilidade de eliminar as primeiras plantas localizadas próximas ao carregador.

A partir destes resultados não foi possível encontrar um padrão de comportamento da produtividade no período entre as campanhas realizadas, impossibilitando o ajuste do modelo encontrado na 1ª campanha para estimativa dos valores de produtividade no final do ciclo da cultura.

Em relação ao comportamento espectral os dados mostraram, de uma maneira geral, uma diminuição nos valores de reflectância da Banda 4 (IVP) e do índice de vegetação GVI. Estes resultados, mais uma vez, reforçam a discussão a respeito do comportamento da resposta espectral no estágio de crescimento vegetativo, onde é maior a quantidade de área foliar e o

acúmulo de água no mesófilo da folha enquanto que, no estágio de maturação se apresenta com maior senescência das folhas e menor acúmulo de água no mesófilo da folha.

Para três amostras, o delta da resposta espectral referente ao índice GVI apresentou valores positivos e/ou próximos de zero, contrários à discussão anterior em relação ao padrão de valores negativos encontrados na maioria das amostras. Este comportamento pode se justificar, mais uma vez, pela não correspondência espacial entre os pares de amostras obtidos nas duas imagens devido a variação da cultura da cana-de-açúcar.

5.3.3. Considerações em relação a metodologia

A partir destes resultados alcançados, foram apontadas algumas considerações a respeito da metodologia empregada. A metodologia utilizada para obtenção de dados de produtividade promoveu maior dinâmica na realização dos trabalhos de campo, utilizando-se de amostras com um volume médio de material compatível com a capacidade de cada um dos compartimentos de carga dos veículos de transporte utilizados pela usina. A localização das parcelas próximo aos carregadores possibilitou a coleta de uma maior quantidade de material amostral, importante para uma cultura que apresenta uma alta variação, e ainda, interferindo o mínimo possível no restante da lavoura. Desta forma, foi possível viabilizar a relação entre a melhor representatividade da variação da produtividade da cana-de-açúcar e a disponibilidade de recursos por parte da usina.

Em contrapartida, esta metodologia proporcionou uma maior variação nos dados de produtividade em relação a resposta espectral, diminuindo a correlação entre estes valores. Como alternativa a melhoria desta relação é recomendável considerar a aplicação de uma faixa de bordadura entre o carregador e a amostra.

5.3.4. Análise das melhores correlações encontradas

Após uma análise geral da correlação entre a produtividade e as diversas informações espectrais foram escolhidos os dados que melhor se correlacionaram para uma análise mais detalhada dos resultados encontrados.

Os dados obtidos na primeira campanha foram apresentados graficamente na figura 17 com o objetivo de realizar uma análise mais detalhada das melhores correlações encontradas na tabela 6. Os dois gráficos superiores mostram o comportamento de todos os pontos de amostragem pertencentes aos três grupos classificados de acordo com suas

característica apresentadas na tabela 3. Nota-se uma nítida tendência na distribuição dos pontos e que apenas alguns deles fogem a esta tendência.

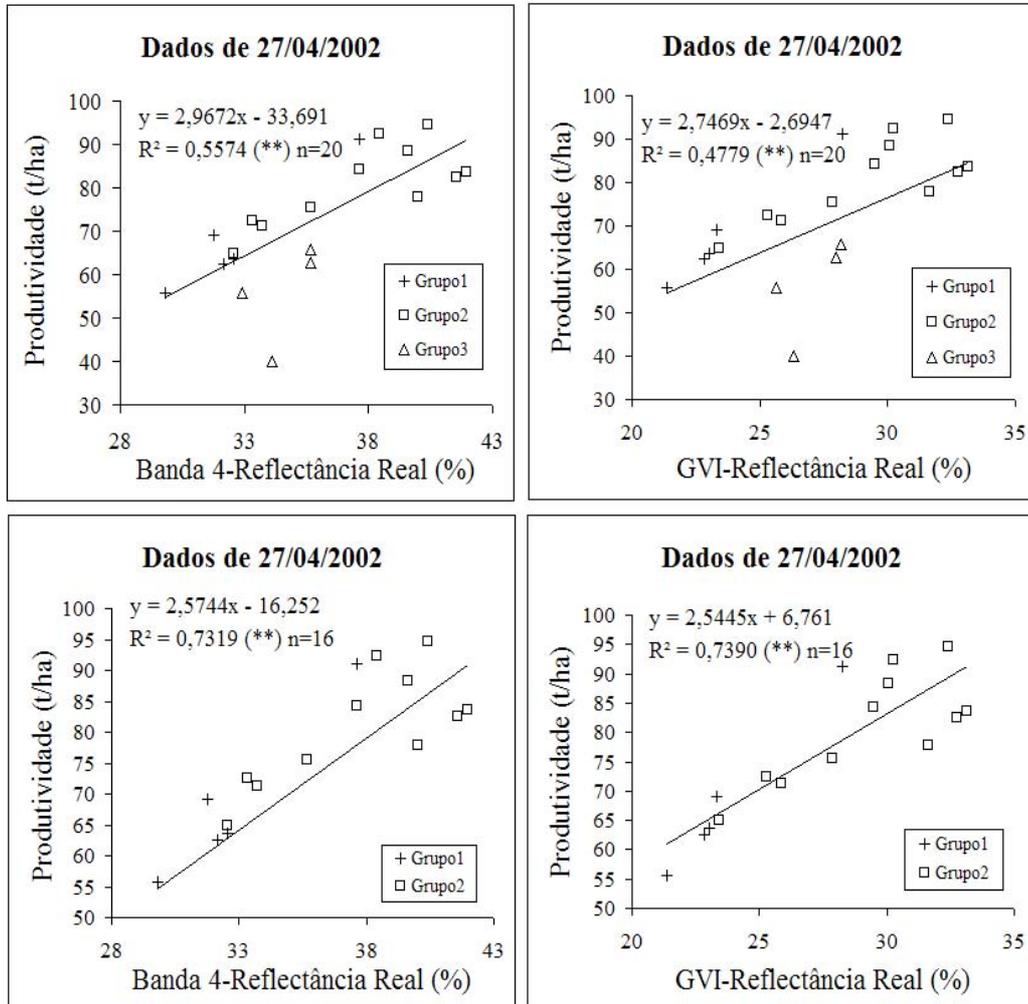


Figura 17 – Gráficos das equações de regressão linear aplicadas entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI referentes à imagem de 27/04/2002.

Nos dois gráficos inferiores apresentados na figura 17 constatou-se um aumento na correlação ocasionada pela eliminação das amostras do grupo 3, as quais não acompanharam a tendência da reta de correlação por se apresentar 3 meses mais precoce em relação ao ciclo das demais amostras.

Ainda em relação aos gráficos inferiores da figura 17 observou-se que a distribuição dos pontos referentes aos grupos 1 e 2 seguiu a mesma tendência apesar de representarem variedades diferentes. Deste modo constatou-se que é possível representar em um modelo duas

variedades que apresentaram a mesma tendência na distribuição dos pontos. VALERIANO (1992) trabalhando com medidas de reflectância de campo e aplicação do modelo SAIL observou que os parâmetros agrônômicos da cultura do trigo estiveram mais relacionados à fenologia dos dosséis, havendo pouca diferença entre as cultivares. Desta forma pode-se considerar que em alguns casos, a influência dos inúmeros fatores fenológicos responsáveis pela variação da resposta espectral faz com que diferenças existentes entre variedades não sejam identificadas.

A distribuição dos pontos nos gráficos de correlação se apresentou muito semelhante em relação a resposta espectral da banda 4 e do índice GVI.

O comportamento apresentado pelos pontos pertencentes aos grupos 1 e 2 apresentou melhor correlação entre os dados espectrais e de produtividade através da análise de regressão pelo modelo polinomial de 2º grau (figura 18).

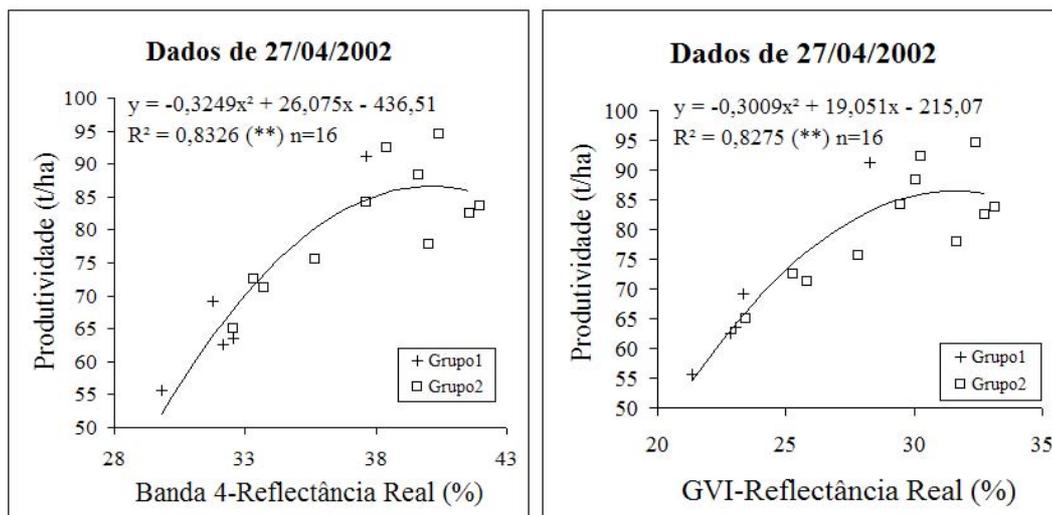


Figura 18 – Gráficos das equações polinomiais de 2º grau aplicadas entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI referentes à imagem de 27/04/2002.

O coeficiente de determinação das análises apresentado na figura 18 mostrou que, 83% da variação da produtividade foi explicada pela resposta espectral da Banda 4 e do índice GVI.

Na figura 19 é mostrada a representação gráfica da análise de regressão linear aplicada aos dados da 2ª campanha. Seguindo a mesma discussão apresentada em relação aos valores de correlação da tabela 6 observou-se, entre os valores de produtividade e resposta

espectral da Banda 4, a inexistência de uma tendência na distribuição dos pontos em ambos os gráficos devido as características, já apresentadas, da resposta espectral de uma cultura em fase de maturação.

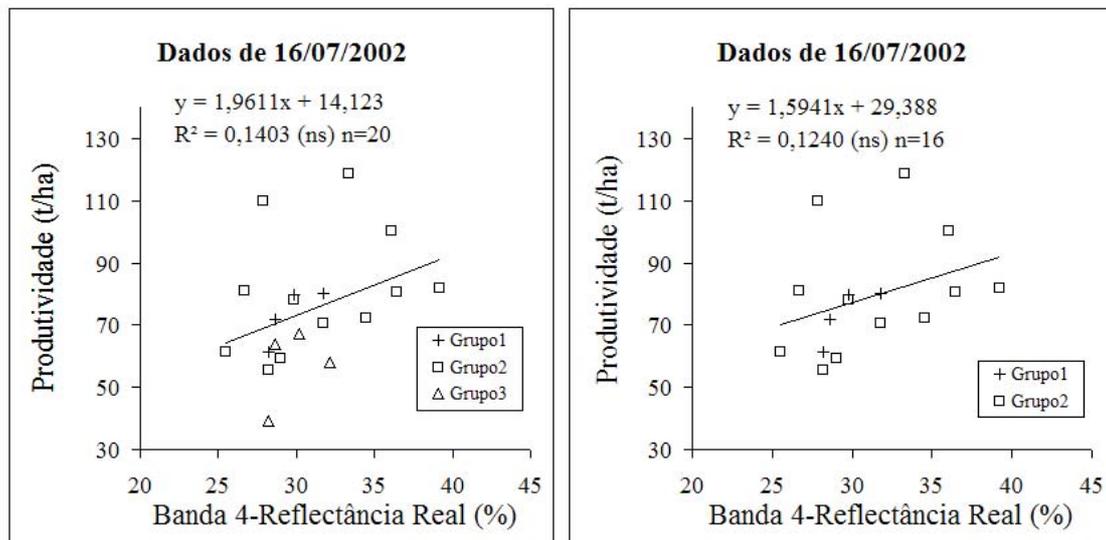


Figura 19 – Gráficos das equações de regressão linear aplicadas entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 referentes à imagem de 16/07/2002.

5.3.5. Simulação do modelo de produtividade

O modelo de produtividade escolhido para simulação foi o apresentado na figura 20 (a) utilizando dados espectrais de reflectância da Banda 4.

Através do modelo de produtividade, foram obtidas as estimativas das produtividades para as 16 amostras utilizadas na obtenção deste modelo (tabela 8). Esta estimativa foi correlacionada com a produtividade medida nos trabalhos de campo e obteve-se uma explicação da variação da produtividade através do modelo de 83% (figura 20 (b)). Observa-se uma nítida tendência dos pontos em torno da reta de regressão, exceto para alguns que se encontram agrupados em torno dos valores máximos no final da reta.

Tabela 8 – Dados de produtividade real e estimada pelo modelo.

| Amostra | Produtividade | | Dif. Observada -Estimada | |
|------------------|---------------|----------|--------------------------|----------|
| | Observada | Estimada | Absoluta | Relativa |
| | (t/ha) | | (t/ha) | (%) |
| 2 | 55,66 | 52,03 | 3,63 | 6,53 |
| 4 | 62,57 | 66,01 | -3,44 | -5,50 |
| 5 | 63,59 | 67,99 | -4,40 | -6,93 |
| 6 | 64,97 | 67,99 | -3,02 | -4,65 |
| 1 | 69,12 | 63,93 | 5,19 | 7,51 |
| 9 | 71,29 | 73,34 | -2,05 | -2,87 |
| 19 | 72,49 | 71,66 | 0,83 | 1,15 |
| 20 | 75,55 | 80,25 | -4,70 | -6,22 |
| 17 | 77,89 | 86,65 | -8,76 | -11,25 |
| 16 | 82,54 | 85,98 | -3,44 | -4,17 |
| 14 | 83,68 | 85,56 | -1,88 | -2,25 |
| 10 | 84,24 | 84,66 | -0,42 | -0,49 |
| 7 | 88,36 | 86,57 | 1,79 | 2,03 |
| 3 | 91,17 | 84,66 | 6,51 | 7,14 |
| 8 | 92,39 | 85,72 | 6,67 | 7,22 |
| 15 | 94,59 | 86,63 | 7,96 | 8,41 |
| Média* = | | | 4,04 | 5,27 |
| Desvio padrão* = | | | 2,47 | 2,94 |

* valores calculados desconsiderando o sinal dos dados.

As diferenças entre a produtividade observada e a estimada pelo modelo através dos dados espectrais apresentadas na tabela 8 nos mostram, desconsiderando o sinal positivo ou negativo, um erro médio de 4,04t/ha com uma desvio padrão de 2,47t/ha e ainda em relação a diferença relativa foi observado um erro médio de 5,27% com uma desvio padrão de 2,94t/ha.

Foram realizados testes de substituição que consistiram em retirar um determinado valor de produtividade estimada e recalculá-lo utilizando a equação resultante do modelo obtido para as 15 amostras restantes.

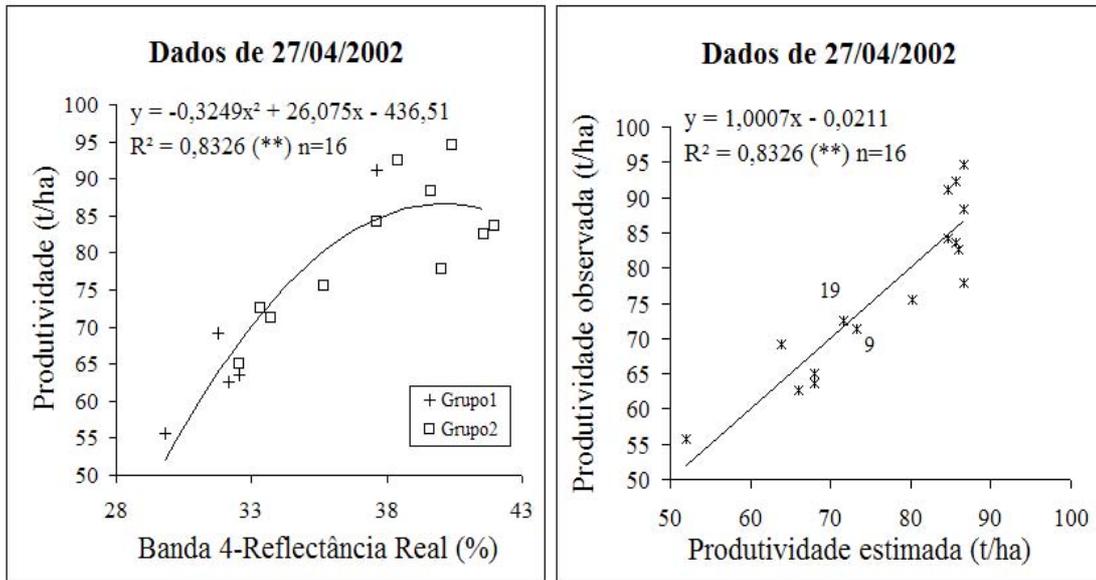


Figura 20 – Gráfico da equação de ajuste entre a produtividade e a resposta espectral da Banda 4 para a imagem de 27/04/2002 (a). Gráfico da equação de regressão aplicada entre a produtividade observada e a produtividade estimada pelo modelo (b).

Ao realizar os testes de substituição dos valores de produtividade estimados, a partir da resposta espectral, na equação apresentada no gráfico a direita da figura 20, foram obtidos erros de $-2,23\text{t/ha}$ ou $-3,13\%$ e $0,64\text{t/ha}$ ou $0,89\%$ respectivamente às amostras 9 e 19, que se apresentam em destaque. Estes resultados mostram que a aplicação de um modelo de produtividade utilizando-se dados espectrais da cultura podem contribuir de forma significativa na estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.

6. CONCLUSÕES

Faz-se necessário apresentar, a partir dos resultados obtidos, a comprovação da hipótese de existência de correlação entre a quantidade de biomassa do dossel de cana-de-açúcar e sua resposta espectral.

Verificou-se, por meio dos resultados de variação encontrados sob diferentes condições atmosféricas, a importância da utilização da radiação direta para correção dos efeitos dos componentes atmosféricos nas imagens. E ainda, através do ajuste do comportamento espectral da resposta da cultura da cana-de-açúcar ao comportamento padrão da vegetação para as diferentes regiões do espectro eletromagnético.

No entanto, a correção do efeito dos componentes atmosféricos na resposta espectral da cana-de-açúcar não teve influência na correlação entre os dados de produtividade e de resposta espectral das amostras analisadas. Mostrando neste caso, que a variação dos dados analisados sofreram maior influências de outros fatores inerentes a esta relação do que os efeitos dos componentes atmosféricos.

As informações espectrais da Banda 4, referente ao infravermelho próximo, e do índice de vegetação GVI foram as que melhor correlacionaram aos dados de produtividade, ambas explicando 83% da variação da produtividade.

Os dados espectrais da Banda 4 do índice GVI obtidos em 23/03/2001, aproximadamente 7 meses antes da colheita, explicaram 51,6% e 52,66% da variação da produtividade encontrada no final do ciclo da cultura. Mostrando-nos que a resposta espectral pode, de certa forma, auxiliar no acompanhamento da variação espacial da cultura da cana-de-açúcar e no processo de estimativa da produção a partir dos estágios iniciais de crescimento vegetativo.

Para os dois anos de estudo foi observado que a resposta espectral da cultura da cana-de-açúcar em seu estágio de maturação apresenta baixa correlação com a produtividade. Este fato foi atribuído a maior senescência das folhas, menor atividade fotossintética e menor acúmulo de água no mesófilo das folhas, resultando em uma maior variação na resposta espectral do dossel ocasionada por fatores não inerentes a biomassa. O acamamento das plantas apresentado neste estágio é um outro fator que possivelmente tenha influenciado nestes resultados.

A metodologia aplicada no segundo ano de estudo promoveu maior dinâmica nos trabalhos de campo devido a sua adaptação às características e disponibilidade de recursos da usina. No entanto, atribui-se à esta metodologia parte da variação não explicada pelos modelos, devido principalmente ao efeito da bordadura na colheita das plantas localizadas próximo ao carreador.

A alta variação encontrada nos dados de produtividade, associada à metodologia de distribuição das amostras de mesmo padrão de resposta espectral influenciou de forma negativa na análise da evolução da produtividade entre as duas campanhas. Não permitindo o ajuste dos modelos encontrados na primeira campanha aos dados de produtividade no final do ciclo da cultura.

Por isso sugere-se uma análise mais detalhada da variação da cultura da cana-de-açúcar para um melhor acompanhamento da evolução da biomassa. Além da consideração de uma faixa de bordadura para as plantas que se encontram sob a influência do carreador.

O modelo polinomial de 2º grau, obtido por meio dos dados de reflectância da banda 4 e do índice GVI, foram os que melhor se adaptaram ao comportamento dos dados de produtividade da cultura.

A produtividade estimativa pelo modelo, utilizando-se da resposta da banda 4, apresentou um erro médio de 4,04t/ha e um desvio padrão de 2,47t/ha.

Ao aplicar testes de substituição na equação do modelo que apresentou maior correlação, foram obtidos erros de -3,13% e 0,89%, comprovando a eficiência da utilização da resposta espectral no processo de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar.

Devido aos resultados apresentados sugere-se que seja dada continuidade a este estudo considerando outras características da cultura em relação a variedade, estágio de corte, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSI, R.R.; PEDRO, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. São Paulo: Fundação CARGILL, cap. 1, p. 42-87, 1987.
- ANTUNES, Mauro A.H.; BATISTA, Getúlio Teixeira; ASSAD, Eduardo D.; MOREIRA, Maurício Alves. Utilização de medidas espectrais para o monitoramento da cultura da soja (*Glycine Max* (L.) Merrill) ao longo do ciclo de crescimento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba, p. 42-51, 1993.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.64, n.3, p.234-253, jun.,1998.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and Limits of vegetation Indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, 35(2-3): 161-173, 1991.
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or APAR estimation. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'89). Canadian Symposium on Remote Sensing, 12., Vancouver, 1989. Remote Sensing: an economic tool for the nineties. Piscataway: IEEE, 1989. v. 1, p. 1355-1358.
- BATISTA, Getúlio Teixeira; TARDIN, Antônio Tebaldí; CHEN, Sherry Chou; DALLEMAND, Jean F. Avaliação de produtos HRV/SPOT e TM/LANDSAT na discriminação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 25(3): 379-386, mar.,1990.
- CAVALLI, Antônio Carlos. **Utilização de dados espectrais dos sensores TM/LANDSAT-5 e AVHRR/NOAA-14 como indicadores de processos de degradação do solo**. 153 p. Tese (Doutorado em Geociência) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1999.

- CLEVERS, J. G. P. W. 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(1): 25-37, 1989.
- CLEVERS, J.G.P.W. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 53-70, 1988.
- CRIST, E.P.; CICONE, R.C. Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 50, p. 343-352, 1984.
- DEMETRIADES-SHAH, T. H.; COURT, M. N. Oblique view reflectance for assessing nitrogen status of incomplete canopies. **International Journal of Remote Sensing**, 8(7):1049-1050, 1987.
- DIKER, K.; BAUSCH, W.C.; PODMORE, T.H. GIS Mapping of Plant Parameters and Yield Potential Estimated by Remote Sensing. **ASAE Meeting**, Orlando/ Flórida. July 12 – 16, 1998. Presentation Paper n. 983143.
- DONZELI, Pedro L.; VALÉRIO FILHO, M.; PINTO, S. A. F. et al. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. In: LOMBARDI NETO, F. & CAMARGO, O. A., eds. Microbacia do córrego São Joaquim (município de Pirassununga, SP). Campinas, 1992. p.91-120.
- EPIPHANIO, José Carlos Neves e FORMAGGIO, Antônio Roberto. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.10, p.1615-1624, 1991.
- EPIPHANIO, José Carlos Neves; FORMAGGIO, Antônio Roberto; FRANÇA, Geraldo Victorino de. Avaliação das bandas TM do satélite LANDSAT-5 na discriminação entre culturas de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 25(3): 371-377, mar.,1990.
- EPIPHANIO, José Carlos Neves; GLERIANI, José M.; FORMAGGIO, Antônio Roberto; RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor. Índices de vegetação no sensoriamento remoto

- da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.6, p.445-454, jun., 1996.
- EIPHANIO, José Carlos Neves; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, Antônio Roberto. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.3, p.439-447, 1994.
- GAUSMAN, H.W. Leaf reflectance of near-infrared. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 51(11): 1725-1734, 1985.
- GITELSON, Anatoly A.; KAUFMAN, Yoram J.; MERZLYAK, Mark N. Use of a channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, 58: 289-298, dec., 1996.
- GOEL, N. S. Models of Vegetation Canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing of Environment**, New York, 4(1): 1-212, 1988.
- HINZMAN, L. D.; BAUER, M. E.; DAUGHTRY, C. S. T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, New York, 19: 47-61, 1986.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, 25(3): 295-309, 1988.
- JOAQUIM, Antônio Celso. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara - SP, através de análise de nível de cinza em imagens LANDSAT/TM**. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.
- JOHNSON, Lee F. Nitrogen influence on fresh-leaf NIR spectra. **Remote Sensing of Environment**, New York, 78: 314-320, dec., 2001.
- JORDAN, C. F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

- KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 30(2): 261-270, 1992.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, 1(3): 155-159, 1970.
- LONDON, J.; BOJKOV, R.J.; OLTMANS, S.; KELLEY, J.I. Atlas of the global distribution of total ozone July 1957 - June 1967. Ncar Technical Note n.113 + STR.1976.
- MCPETERS, Richard. **Total Ozone Mapping Spectrometer**. <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead.html>, 20/02/2002.
- MENDONÇA, F.J.; BATISTA, Getúlio Teixeira; TARDIN, Antônio Tebaldi. **Projeto CANASATE: sensoriamento remoto aplicado ao levantamento da cultura canavieira**. 69p. Relatório Técnico - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989.
- MONTEIRO, Walbert Cunha. **Sensoriamento Remoto**. <<http://geofree.hpg.com.br/sensoriamentoremoto/sensoriamentoremoto1.htm>>, 07/03/2001.
- MOREIRA, Romero da Costa. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 114p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000. (INPE-7528-TDI/735)
- 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.
- 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**. 114p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

- PIEROSSI, M.A., NEVES, J.L.M. Mapeamento de produtividade da cana-de-açúcar. In: BALASTREIRE, L.A. **O estado da arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba, 2000. 224 p.
- PINTER, P.J.; JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. Multidate spectral reflectance as predictors of yield in a water stressed wheat and barley. **International Journal of Remote Sensing**, 2(1): 43-48, 1981.
- PRICE, J.C., BAUSCH, W.C. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. **Remote Sensing Environmental**, 52:55-65, 1995.
- QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, 48(2): 119-126, 1994.
- RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43(12): 1541-1552, 1977.
- RIPPLE, W. J. Relationships of spectral reflectance to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52(10):1669-1675, 1986.
- ROBERTS, D. A.; GREEN, R. O.; ADAMS, J. B. Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, n. 3, p. 223-240, 1997.
- RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, 55(2): 95-107, 1996.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. **Proceedings**. Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v. 1, p. 309- 317. (NASA SP-351).
- RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor. **Dados LANDSAT na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. 114p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1985.

- RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor; BATISTA, Getúlio Teixeira. **Relatório da fase I do projeto ESTIMA**: desenvolvimento de um modelo para estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar baseado em dados Landsat e agrometeorológicos. 93p. Relatório Técnico – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1988.
- RUDORFF, Bernardo Friedrich Theodor; BATISTA, Getúlio Teixeira. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 12, p. 2477-2484, 1991.
- STEVEN, M.D.; MILLAR, C. Satellite Monitoring for Precision Farm Decision Support. In: The First European Conference on Precision Agriculture, 1997, J.V. Stafford. **Proceedings...** London, SCI. 1997.
- TARDIN, Antônio Tebaldi; ASSUNÇÃO, Getúlio Vargas de; SOARES, João Viane. Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de furnas, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 27(9): 1355-1361, set., 1992.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, New York, 8(2): 127-150, 1979.
- VALERIANO, Márcio de Morisson. **Reflectância espectral do trigo irrigado (*Triticum aestivum*, L.) por espectrorradiometria de campo e aplicação do modelo SAIL**. 149p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.
- WIEGAND, C.L., RICHARDSON, A.J., ESCOBAR, D.E., GERBERMANN, A.H. Vegetation indices in crop assessments. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 105-119, 1991.
- WIEGAND, C.L., RICHARDSON, A.J., JACKSON, R.D., PINTER JR., P.J., AASE, J.K., SMIKA, D.E., LAUTENSCHLAGER, L.F., MCMURTREY, J.E. Development of agrometeorological crop model inputs from remotely sensed information. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-24, n. 1, p. 90-98, Janeiro 1986a.

- WIEGAND, C.L., RICHARDSON, A.J., NIXON, P.R. Spectral components analysis: A bridge between spectral observations and agrometeorological crop model. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-24, n. 1, p. 83-89, Janeiro 1986b.
- WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; ESCOBAR, D.E.; GERBERMAN, A.H. Vegetation indices in crop assessments. **Remote Sensing of Environment**, New York, 35(2): 105-119, 1991.
- WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; KANEMASU, E.T. Leaf area index estimates for wheat from Landsat and their implications for evapotranspiration and crop modeling. **Agronomy Journal**, v. 71, n. 2, p. 336-342, 1979.
- ZULLO JR., Jurandir. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

ANEXO 1 – Dados de produtividade e resposta espectral do primeiro ano.

| amostra | Tipo de parcela* | Produtividade (ton/ha) | 23/03/2001 | | 02/11/2001 | |
|---------|------------------|---------------------------|--------------|-------|-------------|------|
| | | | B4 | GVI | B4 | GVI |
| | | | (ref.real %) | | (ref.real%) | |
| 8 | 1 | 67,56 | 24,22 | 17,75 | 18,92 | 5,64 |
| 13 | 1 | 82,72 | 25,49 | 18,99 | 18,53 | 5,08 |
| 21 | 1 | 66,67 | 23,63 | 17,23 | 20,10 | 7,12 |
| 22 | 1 | 78,67 | 24,12 | 17,70 | 19,80 | 6,41 |
| 23 | 1 | 83,56 | 24,90 | 18,37 | 18,43 | 5,02 |
| 25 | 1 | 73,78 | 25,10 | 18,61 | 19,71 | 6,27 |
| 30 | 1 | 81,33 | 24,80 | 18,33 | 18,82 | 5,22 |
| 32 | 1 | 69,35 | 24,61 | 18,18 | 19,12 | 6,04 |
| 34 | 1 | 80,00 | 24,90 | 18,50 | 20,00 | 6,83 |
| 35 | 1 | 78,67 | 24,80 | 18,38 | 19,51 | 6,55 |
| 36 | 1 | 72,44 | 24,90 | 18,54 | 18,92 | 6,15 |
| 37 | 1 | 81,78 | 25,29 | 18,73 | 18,82 | 5,92 |
| 38 | 1 | 82,38 | 25,00 | 18,60 | 17,94 | 5,50 |
| 39 | 1 | 77,33 | 24,51 | 17,99 | 18,82 | 6,14 |
| 40 | 1 | 83,56 | 24,61 | 18,28 | 18,73 | 5,93 |
| 42 | 1 | 77,33 | 25,69 | 19,06 | 17,84 | 5,11 |
| 44 | 1 | 80,89 | 24,61 | 18,13 | 18,63 | 5,99 |
| 45 | 1 | 80,44 | 24,90 | 18,34 | 17,84 | 5,03 |
| 46 | 1 | 74,85 | 24,12 | 17,78 | 19,80 | 6,88 |
| 47 | 1 | 94,22 | 26,37 | 19,66 | 18,04 | 4,97 |
| 48 | 1 | 78,57 | 24,41 | 18,03 | 19,71 | 6,68 |
| 49 | 1 | 78,67 | 24,22 | 17,81 | 19,71 | 6,86 |
| 50 | 1 | 74,67 | 24,51 | 18,00 | 19,71 | 6,89 |
| 2 | 2 | 82,35 | 23,63 | 17,27 | 19,31 | 6,14 |
| 3 | 2 | 64,47 | 21,76 | 15,35 | 21,18 | 7,79 |
| 4 | 2 | 73,14 | 22,84 | 16,11 | 19,71 | 6,37 |
| 5 | 2 | 55,79 | 21,96 | 15,26 | 20,49 | 6,96 |
| 7 | 2 | 60,64 | 22,25 | 15,67 | 20,39 | 7,15 |
| 9 | 2 | 67,50 | 23,04 | 16,26 | 22,06 | 8,64 |
| 12 | 2 | 75,18 | 24,12 | 17,60 | 19,51 | 6,36 |
| 15 | 2 | 74,81 | 22,45 | 15,94 | 19,31 | 6,64 |
| 17 | 2 | 63,46 | 23,82 | 17,33 | 19,90 | 6,94 |
| 19 | 2 | 68,73 | 22,94 | 16,20 | 21,57 | 8,33 |
| 20 | 2 | 70,78 | 25,39 | 18,55 | 18,43 | 5,50 |
| 26 | 2 | 72,86 | 24,51 | 17,93 | 18,63 | 6,24 |
| 51 | 2 | 88,13 | 24,71 | 18,22 | 19,12 | 6,34 |
| 52 | 2 | 85,90 | 25,20 | 18,77 | 19,90 | 6,71 |
| 54 | 2 | 71,73 | 24,12 | 17,73 | 19,31 | 6,63 |
| 55 | 2 | 90,72 | 25,29 | 18,72 | 17,84 | 5,30 |
| 56 | 2 | 81,35 | 25,39 | 18,78 | 19,31 | 6,51 |
| 57 | 2 | 72,63 | 24,41 | 17,88 | 19,22 | 6,29 |
| 58 | 2 | 79,14 | 24,22 | 17,59 | 19,61 | 6,62 |
| 59 | 2 | 74,01 | 24,61 | 18,03 | 19,41 | 6,73 |
| 60 | 2 | 76,17 | 24,61 | 18,28 | 19,22 | 6,54 |
| 61 | 2 | 76,05 | 24,80 | 18,37 | 17,94 | 5,41 |

* 1 – parcelas de 15x15metros; 2 – parcelas de 40x40metros.