



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-14803-TDI/1246**

**MONITORAMENTO DA ÁREA COLHIDA DE CANA-DE-  
AÇÚCAR POR MEIO DE IMAGENS DO SENSOR MODIS**

Daniel Alves de Aguiar

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelo Drs. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff e Maurício Alves Moreira,  
aprovada em 20 de março de 2007.

INPE  
São José dos Campos  
2007

Publicado por:

**esta página é responsabilidade do SID**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**Solicita-se intercâmbio  
We ask for exchange**

**Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.**



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-14803-TDI/1246**

## **MONITORAMENTO DA ÁREA COLHIDA DE CANA-DE- AÇÚCAR POR MEIO DE IMAGENS DO SENSOR MODIS**

Daniel Alves de Aguiar

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelo Drs. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff e Maurício Alves Moreira,  
aprovada em 20 de março de 2007.

INPE  
São José dos Campos  
2007

528.711.7 (815.6)

Aguiar, D. A. de

Monitoramento da área colhida de cana-de-açúcar por meio de imagens do Sensor MODIS / Daniel Alves de Aguiar. - São José dos Campos: INPE, 2007.

99 p. ; (INPE-14803-TDI/1246)

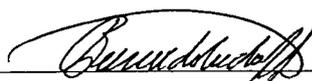
1. Sensoriamento Remoto. 2. Cana-de-açúcar.  
3. MODIS. 4. Índice de vegetação da diferença normalizada.  
5. Modelo linear de mistura espectral. 6. São Paulo (estado).  
I. Título.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Sensoriamento Remoto

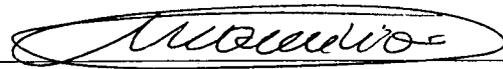
Dr. Yosio Edemir Shimabukuro

  
Presidente / INPE / SJCampos - SP

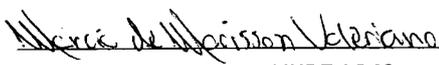
Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff

  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

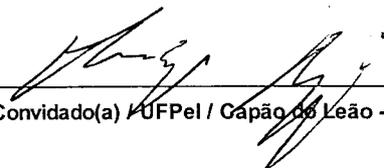
Dr. Maurício Alves Moreira

  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Márcio de Morisson Valeriano

  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Rodrigo Rizzi

  
Convidado(a) / UFPel / Capão do Leão - RS

Aluno (a): Daniel Alves de Aguiar

São José dos Campos, 20 DE MARÇO DE 2007



*“A persistência é o caminho do êxito”* - Charles Chaplin



*À minha mãe e a meu irmão.*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Dr. Bernardo F. T. Rudorff, pela orientação, oportunidades oferecidas e conhecimentos transmitidos.

Ao Dr. Rodrigo Rizzi, pela participação efetiva em todas as etapas deste trabalho, pelas idéias e contribuições dadas.

Aos pesquisadores Dr. Yosio E. Shimabukuro, Dr. Camilo Rennó e João Pedro pelas dúvidas sanadas, idéias e presteza em me atender.

À minha família, pelos esforços a favor da minha formação, pelo apoio e pelo incentivo.

A meu tio Joaquim, pelo exemplo dado.

Aos amigos de república (Daniel T., Enner, Fabio, Ive, Javier, Rui, Tercília e Wagner) que dividiram as alegrias, os anseios e as dificuldades do período em que aqui vivi.

Aos meus amigos de Americana, com os quais pude passar ótimos momentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e à União da Indústria de Cana-de-Açúcar - UNICA, pelo apoio financeiro.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em especial à Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR, por ter permitido a realização deste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para realização desta pesquisa...

Muito obrigado!



## RESUMO

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários, sendo o maior produtor e exportador de açúcar e álcool do mundo. O Estado de São Paulo é responsável por aproximadamente 60% de toda produção nacional de cana, álcool e açúcar e por 70% das exportações. No atual mercado globalizado é grande a demanda por informações confiáveis e objetivas sobre a quantidade de matéria prima disponível para a produção de açúcar e álcool, uma vez que isto afeta diretamente a cotação destes produtos na bolsa de valores. Em adição, informações sobre o modo de colheita da cana (com queima ou sem queima - cana crua) ganham importância no contexto ambiental. O sensoriamento remoto, associado às técnicas de geoinformação, tem um grande potencial para monitorar a atividade canavieira e fornecer informações confiáveis e objetivas sobre área colhida e o modo de colheita. Levando em consideração que a cultura da cana-de-açúcar possui características favoráveis à sua identificação, mapeamento e monitoramento em imagens de satélites, o uso do sensor MODIS para estimativa de área de cana colhida ao longo da safra torna-se uma opção válida. Esta hipótese está baseada na distribuição gratuita das imagens do sensor MODIS, que apresenta alta resolução temporal, maximizando a probabilidade de se obter imagens livres de nuvens. Desta forma, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia operacional com o uso destas imagens aplicada no Estado de São Paulo, a fim de fornecer informações objetivas sobre a atividade de colheita. Para cumprir tal objetivo, foram testadas diferentes técnicas de processamento de imagens, i.e, modelo linear de mistura espectral, álgebra de imagens e uso de índice de vegetação (NDVI) com o intuito de apontar as vantagens e as limitações de cada técnica para estimativa de área de cana colhida. Estas técnicas foram aplicadas sobre composições multitemporais de NDVI (MOD13Q1), composições desenvolvidas para detecção do corte da cana (MODCSH) e imagens diárias. Para validação das estimativas foram utilizadas imagens de sensores de média resolução espacial (Landsat-5 e CBERS-2) e dados de campo provenientes de uma usina sucroalcooleira. Os melhores resultados da estimativa de área foram obtidos com a subtração entre as composições MODCSH que estimou 95,2% da área de referência e obteve a melhor precisão temporal ( $R = 0,95$ ; para regressão entre as datas de colheita referência e as datas de colheita estimadas). Foi possível identificar o modo de colheita da cana por meio da aplicação do modelo linear de mistura espectral sobre as imagens de reflectância diárias MODIS. Por fim, a metodologia apresentada, com o uso das imagens MODIS, possibilitou o monitoramento da colheita da cana-de-açúcar.



## SUGAR CANE HARVESTED AREA MONITORING USING MODIS IMAGES

### ABSTRACT

Brazil is among the world leaders in producing and exporting several agricultural products and is the largest producer and exporter of sugar and alcohol. The State of São Paulo is responsible for approximately 60% of the entire national production of cane, alcohol and sugar and for 70% of the exportations. In the current globalized market there is a great demand for reliable and objective information on the amount of raw material available to sugar and alcohol production, since this affects directly the quotation of these products in stock exchange. In addition, information about the type of harvest (with burning or without burning – raw cane) is relevant to the environment. Remote sensing techniques associated to GIS technology have a great potential to monitor the sugarcane harvest activity and provide reliable and objective information not only on the amount of harvested area but also on the type of harvest. Considering that the sugarcane crop has several favorable characteristics to be identified, mapped and monitored through remote sensing satellite images it seems that free of charge MODIS images are a promising alternative to monitor the sugarcane harvest activity. This hypothesis is based on the high temporal resolution of the MODIS images which maximizes the chance of obtaining cloud free images. Therefore, the objective of this work was to develop an operational procedure using MODIS images in São Paulo State in order to provide objective information about the sugarcane harvest activity. To achieve this objective different image processing techniques were tested, i.e., linear spectral mixture model, image algebra and the use of vegetation index (NDVI) with the intention to point out advantages and disadvantages of each technique to estimate sugarcane harvested area. These techniques were applied over multitemporal compositions of NDVI (MOD13Q1), compositions developed to detect the type of harvest (MODCSH) and daily reflectance images. To validate the estimates medium spatial resolution images were used (Landsat-5 and CBERS-2) and field data provided by a sugar and alcohol Plant. Best results of area estimates were obtained with the subtraction between the MODCSH compositions which estimated 95.2% of the reference area and achieved best temporal precision ( $R=0.95$ ; for the regression between dates of reference and harvested estimates). It was possible to estimate the type of sugarcane harvest applying linear spectral mixture model over the daily reflectance MODIS images. Finally, the presented methodology, with the use of MODIS images, allowed to monitoring the harvest activity of the sugarcane crop.



## SUMÁRIO

**Pág.**

### **LISTAS DE FIGURAS**

### **LISTA DE TABELAS**

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1. Estabelecimento do problema .....	22
1.2. Hipótese e objetivos .....	22
<b>2 FUNDAMENTOS .....</b>	<b>25</b>
2.1. Cultura da cana-de-açúcar .....	25
2.2. Comportamento espectral da cultura de cana-de-açúcar e índices de vegetação .....	26
2.3. Sensoriamento remoto da cultura da cana-de-açúcar .....	28
2.4. Técnicas de detecção de mudança .....	28
2.5. Colheita da cana-de-açúcar .....	30
2.6. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) .....	31
2.7. O Sensor MODIS .....	32
2.7.1. Produtos MODIS .....	33
2.7.1.1. Produto MOD13Q1 .....	34
<b>3 MATERIAIS .....</b>	<b>37</b>
3.1. Área de estudo .....	37
3.2. Imagens de sensores orbitais .....	38
3.3. Imagens TM/Landsat e CCD/CBERS .....	39
3.4. Mapa de referência .....	40
3.5. Mapa e dados das áreas de cana da Usina Catanduva .....	40
<b>4 METODOLOGIA EMPREGADA.....</b>	<b>41</b>
4.1. Pré-processamento dos dados de entrada .....	41
4.2. Criação das imagens MODCSH.....	44
4.3. Comportamento do NDVI das áreas de cana-de-açúcar ao longo da safra .....	46
4.4. Técnicas de detecção do corte da cana para estimativa de área .....	47
4.5. Validação e comparação das técnicas de estimativa de área .....	51
4.6. Identificação do modo de colheita.....	52
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
5.1. Evolução temporal do NDVI das áreas de cana .....	55
5.2. Avaliação das composições MODCSH.....	57
5.3. Avaliação da área estimada por meio de limiar de índice de vegetação .....	61
5.4. Estimativa de área colhida por limiar de perda de biomassa.....	64
5.5. Avaliação da discriminação do modo de colheita .....	75
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>81</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>83</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>89</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>91</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1 - Variação espectral da cana-de-açúcar em imagem MODIS.....	26
2.2 - Tiles MODIS (18 x 36) em projeção sinusoidal..	34
2.3 - Diagrama do processo de composição do produto MOD13Q1.....	35
3.1 - Estado de São Paulo no contexto nacional.....	37
4.1 - Fluxograma da metodologia empregada.....	42
4.2 - Mapa com as áreas de cana no Estado de São Paulo – safra 2004 (a); composição 16 dias de NDVI iniciada no dia 24 de maio de 2004 (b) e recorte das áreas de cana para mesma composição (c).	43
4.3 - Esquema da janela temporal aplicada para a escolha de <i>pixels</i> representativos de áreas colhidas..	45
4.4 - Exemplos de Imagens do sensor CCD do satélite CBERS.	48
4.5 - Imagens NDVI/MODIS.	48
4.6 - Representação esquemática da geração do mapa temático da colheita com as diferentes datas das imagens MOD31Q1 e MODCSH utilizadas na análise.....	49
5.1 - Evolução temporal do NDVI em imagens diárias de áreas de cana-de-açúcar com colheita no mês de junho, safra 2004.	55
5.2 - Evolução temporal do NDVI em imagens diárias de áreas de cana-de-açúcar com colheita nos meses de abril e maio, safra 2004.	56
5.3 - Evolução temporal do NDVI em imagens diárias de áreas de cana-de-açúcar com colheita nos meses de outubro, novembro e dezembro, safra 2004.	57
5.4 - Valores máximos e mínimos de NDVI dos 51 <i>pixels</i> puros durante a safra de 2004.	58
5.5 - Imagens MODC (a), MODCSH (b) e fatiamento da diferença entre elas em azul (c) com sobreposição do tema <i>não cana</i> .	58

5.6 - Evolução temporal do NDVI de <i>pixels</i> puros de cana em imagens MODCSH e MODC na safra 2004. Na abscissa os dias julianos correspondem à data de início da composição. ....	60
5.7 - Evolução da colheita resultante da aplicação de limiar de índice de vegetação sobre composições MODCSH e MODC.....	61
5.8 - Gráfico de dispersão para limiar de 0,538 aplicado sobre composições MODCSH (a) e MODC (b).....	63
5.9 - Fatiamento com limiar de 25% (a) e 23% (b) de perda percentual de biomassa, aplicado sobre imagens proporção MODCSH e MODC. ....	65
5.10 - Gráfico de dispersão para limiar de 23% aplicado sobre composições MODCSH (a) e MODC (b). ....	68
5.11 - Gráfico de dispersão para limiar de 25% aplicado sobre composições MODCSH (a) e MODC (b). ....	68
5.12 - Imagens TM/Landsat de órbita 221 e ponto 75.....	69
5.13 - Área estimada e erros de estimativa por tamanho de área de cana-de-açúcar cultivada por município. ....	70
5.14 - Mosaico final da área de cana colhida por intervalo de análise, resultante da aplicação de limiar de 23% sobre imagens MODCSH. ....	74
5.15 - Recorte do município de Catanduva com áreas de cana colhida por intervalo de análise. ....	75
5.16 - <i>Endmembers</i> escolhidos com base na imagem MODIS/Terra adquirida no dia 214 (01/08/2004). ....	76
5.17 - Proporção das frações em cada pixel analisado. ....	77
5.18 - Imagens fração componente cana (a); palha (b); queimada (c). Composição fração cana (vermelho), palha (verde) e queimada (azul) (d). Em detalhe, área de talhões de cana sob composição imagens fração (e); sob imagem TM/Landsat adquirida no dia 218 (05/08/2004; f) e imagens fração cana (g); palha (h) e queimada (i). 79	

## LISTA DE TABELAS

2.1 - Características gerais do satélite Terra e do sensor MODIS.....	32
3.1 - Imagens de sensores orbitais utilizadas referentes ao ano safra 2004.....	39
4.1 - Ajustes das escalas para validação das técnicas de estimativa.....	51
5.1 - Área estimada de cana colhida absoluta e percentual em intervalos de análise (16 dias); total ao final da safra e comparação com referência. ....	62
5.2 - Área estimada de cana colhida absoluta e percentual em intervalos de 16 dias com limiar de 25% e comparação com referência. ....	66
5.3 - Área estimada de cana colhida total e percentual em intervalos de 16 dias com limiar de 23% e comparação com referência. ....	66
5.4 - Estimativas de área com o uso das imagens MODC e MODCSH.....	71
5.5 - Valores - P resultantes dos testes t e F para regressão e parâmetros.....	72
5.6 - Precisão temporal das técnicas de estimativa de área. ....	72
5.7 - Proporção de endmembers em <i>pixels</i> selecionados.....	77



## 1 INTRODUÇÃO

A associação entre tecnologia, ciência e agricultura, sob a égide do mercado, é uma das principais características do período em que vivemos, denominado técnico-científico-informacional (SANTOS E SILVEIRA, 2001). Novos insumos e variedades, maquinaria de alta tecnologia e performance, bem como infra-estrutura de transporte e armazenamento, concorrem para criar espaços especializados. Não obstante, a informação e o conhecimento são vetores fundamentais para a especialização produtiva.

O sensoriamento remoto orbital possibilita acompanhar, de modo sistemático, as mudanças na superfície da Terra e, dada esta característica, tornou-se uma importante fonte de informação espaço-temporal. Diversas áreas do conhecimento fazem uso destas informações a fim de alcançar uma implementação conseqüente das atividades econômico-sociais. Em outras palavras, tais informações permitem o uso adequado e preciso do tempo e do espaço, multiplicando a eficiência de quem as utiliza, sejam empresas privadas ou órgãos públicos (SANTOS, 1999).

O setor sucroalcooleiro caracteriza-se por uma estreita relação agricultura-indústria e a informação sobre a área colhida tem fundamental importância neste contexto. A programação de funcionamento das usinas é determinada pela quantidade de cana no campo e pelo andamento da colheita. Chuvas contínuas e longos períodos de seca podem impedir a colheita e influenciar a disponibilidade de matéria prima para a produção de açúcar e de álcool e, por conseqüência, os estoques destes produtos para comercialização no mercado interno e externo. Além disso, influem diretamente na cotação destes produtos na bolsa de valores e na política de preços dos mesmos.

Em outro sentido, questões de ordem ambiental têm sido levantadas como conseqüência da queima das áreas de cana para colheita. A emissão de carbono, problemas de saúde decorrentes da poluição e empobrecimento do solo são alguns dos pontos em discussão. Tais questões ganham importância em face do cenário futuro promissor do cultivo da cana-de-açúcar. Segundo estimativas do **B**anco **N**acional de **D**esenvolvimento **E**conômico e **S**ocial (BNDES) serão necessárias 100 novas usinas até 2010 para atender a demanda por etanol.

## 1.1. Estabelecimento do problema

Atualmente a avaliação periódica da evolução da colheita da cana é feita pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), por meio de informações amostrais fornecidas pelas unidades produtoras. Incertezas nas estimativas de área colhida e nas previsões de safra agrícola podem causar implicações em políticas públicas, privadas, em mercado de matéria-prima e na produção de alimentos, além de erros nos cálculos de produtividade (XIAO *et al.*, 2003; SEDANO, 2005; RIZZI *et al.*, 2006). Dadas tais condições, a maior exatidão e a quantificação de incertezas na estimativa de área de cana colhida ganham grande importância.

Em adição, informações sobre o modo de colheita são fundamentais para um sistema de fiscalização da queima da cana. Em última análise, podemos sintetizar as questões levantadas em quatro outras questões, a saber: quando foi colhida a cana? Onde? Qual a extensão da área colhida? E qual o modo da colheita?

O sensoriamento remoto, associado às técnicas de geoinformação, tem grande potencial para monitorar a atividade canavieira e responder a tais questões. Contudo, exemplos de aplicações operacionais do uso do sensoriamento remoto para tal fim são raros no Brasil. Diversos fatores contribuem para a dificuldade de operacionalização de um sistema de estimativa de safra com base nas imagens de sensoriamento remoto. Como exemplo, a baixa resolução temporal dos produtos de sensores remotos, alta incidência de cobertura de nuvens, disponibilidade das imagens e custo de operacionalização.

## 1.2. Hipótese e objetivos

Levando em consideração que a cultura da cana-de-açúcar possui características favoráveis<sup>1</sup> à sua identificação, mapeamento e monitoramento por meio de imagens de sensores remotos (RUDORFF *et al.*, 2004a); este trabalho teve como hipótese que o uso do sensor ***MOD***erate Resolution ***I***maging ***S***pectroradiometer (MODIS), a bordo da plataforma Terra, é uma opção válida para o monitoramento da colheita da cana-de-açúcar.

---

<sup>1</sup> Cultura semi-perene e plantada em áreas de grande extensão.

Esta hipótese está baseada na distribuição gratuita das imagens do sensor MODIS, que apresenta alta resolução temporal, maximizando a probabilidade de se obter imagens livres de nuvens para efetuar o monitoramento da colheita em intervalos de tempo quinzenal ou mensal.

Aguiar *et al.* (2006) apresentaram, de forma preliminar, uma aplicação para o uso das imagens MODIS no monitoramento da colheita da cana no Estado de São Paulo. Com base no trabalho destes autores, na hipótese acima levantada e na importância sobre a disponibilidade de informações confiáveis sobre a evolução e o modo de colheita, foi definido o seguinte objetivo geral:

- Desenvolver uma metodologia operacional com o uso de imagens do sensor MODIS/Terra, a fim de fornecer informações objetivas e confiáveis sobre a evolução da colheita ao longo da safra no Estado de São Paulo.

Pretende-se também cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as estimativas de área de cana colhida obtidas por meio do uso de produtos do sensor MODIS.

- Desenvolver uma composição multitemporal de índice de vegetação para a estimativa da área de cana colhida.

- Identificar o modo de colheita da cana (precedido de fogo ou sem a queima de palha - cana crua) com o uso de modelo linear de mistura espectral.



## 2 FUNDAMENTOS

### 2.1. Cultura da cana-de-açúcar

As principais características da cultura da cana-de-açúcar são um rápido crescimento, reprodução abundante e o aproveitamento econômico de grande parte da planta. O suco da cana-de-açúcar é usado para produção da sacarose e fermentação de produtos como o etanol e o ácido acético. O bagaço da cana também pode ser usado como aditivo de ração animal e para produção de bebidas. Das fibras remanescentes do bagaço, pós-extração do suco, é possível gerar a energia utilizada nas usinas de moagem da cana (PARANHOS, 1987; LINGLE, 1998).

A cultura da cana-de-açúcar foi trazida para o Brasil pelos portugueses que já plantavam a mesma em outras colônias. A introdução da cultura da cana-de-açúcar no país trouxe implicações na economia mundial, pois criou um modelo chamado *plantation*, copiado nos territórios ingleses, holandeses e franceses por todo o Novo Mundo (tropical e subtropical), e que respondia à exploração intensiva de grandes áreas; premissa do colonialismo (EDGERTON, 1958; ALEXANDER, 1973; DEAN, 1996).

Com o advento do automóvel bi-combustível a produção do etanol ganhou um impulso somente visto na década de 70, quando virou uma opção aos carros movidos à gasolina. Outro fator que tem dado força à produção do etanol é a questão ambiental: a substituição dos combustíveis fósseis não renováveis por biodiesel, nas matrizes energéticas de países consumidores intensivos de energia, tem sido apresentada como alternativa para mitigação do efeito estufa (UNICA, 2006).

O Brasil é hoje o maior produtor e exportador de açúcar e álcool do mundo. Metade da produção de açúcar é exportada e gera, anualmente, mais de 2 bilhões de dólares para a balança comercial brasileira. Mais de 5 milhões de hectares de cana são cultivados no Brasil em duas regiões distintas: Centro-Sul e Norte-Nordeste (UNICA, 2006). O Estado de São Paulo é o principal produtor nacional de cana-de-açúcar, sendo responsável por aproximadamente 60% de toda produção nacional de cana, álcool e açúcar e por 70% das exportações (UNICA, 2006).

## 2.2. Comportamento espectral da cultura de cana-de-açúcar e índices de vegetação

A Figura 2.1 apresenta a variação espectral da cana-de-açúcar em diferentes idades e em três regiões distintas do Espectro Eletromagnético (EEM) cobertas por seis bandas espectrais do sensor MODIS ([www.modis.gsfc.nasa.gov/](http://www.modis.gsfc.nasa.gov/)). Na faixa visível (bandas 3-azul, 4-verde e 1-vermelho) a reflectância é baixa em decorrência da absorção da radiação incidente pelos pigmentos das folhas da cana, em especial nas bandas do azul e do vermelho. Já na faixa do infravermelho (bandas 2- e 5-infravermelho próximo e 6-infravermelho médio) a reflectância é alta e aumenta gradativamente com o aumento da quantidade de folhas em função das múltiplas reflexões da radiação incidente nos espaços intracelulares do mesófilo foliar (RUDORFF e BATISTA, 1985).

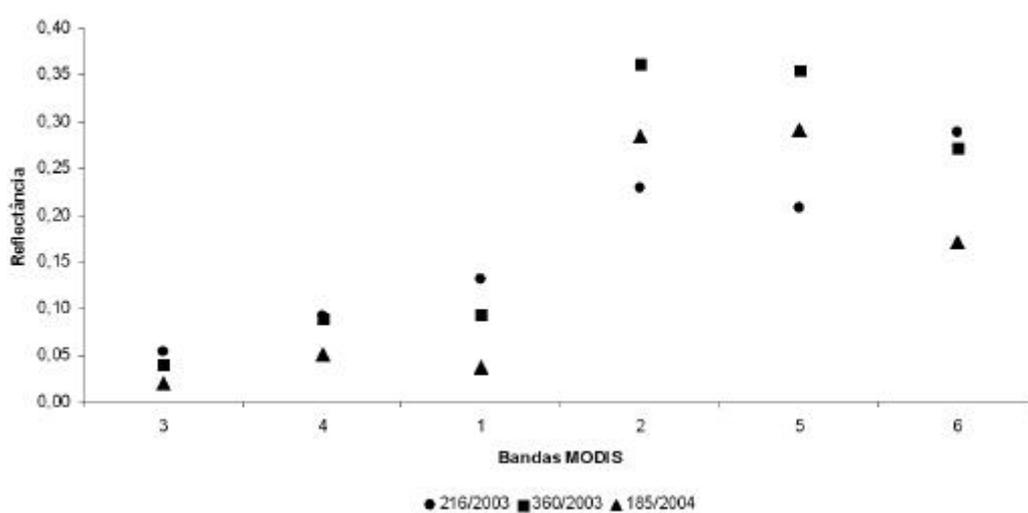


Figura 2.1 – Variação espectral da cana-de-açúcar em imagem MODIS (bandas: 3 – 459-479 nm; 4 – 545-565 nm; 1 – 620-670 nm; 2 – 841-876 nm; 5 – 1230-1250 nm; 6 – 1628-1652 nm) em três idades (31 dias após o plantio - 216/03; 175 dias após o plantio - 360/03 e 364 dias após o plantio / 12 dias antes da colheita - 185/04).

O ganho de biomassa e o conseqüente aumento do Índice de Área Foliar (IAF) são fatores preponderantes na reflectância da planta na faixa do infravermelho próximo. Na cultura da cana-de-açúcar o acúmulo de matéria seca (MS) tem comportamento sigmodal e é dividido em três fases, sejam elas, inicial, com crescimento lento;

intermediária, com crescimento rápido (adquire de 70% a 80% da MS total) e final, quando o crescimento volta a ser lento para que ocorra o acúmulo de sacarose nos colmos (EDGERTON, 1958; PARANHOS, 1987). A reflectância na faixa do infravermelho médio (banda 6) está relacionada com o conteúdo de água da vegetação em função de bandas de absorção de água nesta faixa do EEM (MENESES e NETTO, 2001; SIMÕES *et al.*, 2003).

As diferenças na curva de reflectância da vegetação possibilitam a identificação, por meio de sensores remotos e técnicas de processamento de imagens, dos estádios de desenvolvimento da planta em diferentes épocas e lugares (PRICE, 2003). Outra possibilidade decorrente desta diferença é a criação de Índices de Vegetação (IV) que auxiliam na interpretação de imagens de sensores remotos (MENESES e NETTO, 2001).

Diversos trabalhos, dentre as aplicações agrícolas e florestais, têm feito uso de IV para estimar parâmetros biofísicos (IAF, biomassa, atividade fotossintética e produtividade), que servem de indicadores do crescimento, do vigor da vegetação verde e para monitorar as condições da vegetação (HUETE *et al.*, 1997; LYON *et al.*, 1998; SEDANO *et al.*, 2005; CHUVIECO *et al.*, 2005; LIU e KAFATOS, 2005; XIAO *et al.*, 2005; XIAO *et al.*, 2006).

O índice de vegetação mais utilizado é o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), inicialmente proposto por Rouse *et al.* (1973). Este índice consiste na normalização da diferença entre os valores de reflectância das bandas do infravermelho próximo e do vermelho, variando de -1 a 1. Para uma vegetação verde como, por exemplo, uma lavoura de cana bem desenvolvida, que reflete pouca radiação na banda do vermelho e muita radiação na banda do infravermelho próximo, os valores de NDVI tendem a 1. Já para um solo exposto, p ex. uma lavoura de cana logo após a colheita, que reflete bastante energia tanto no vermelho quanto no infravermelho próximo, os valores de NDVI tendem a zero (LILLESAND e KIEFER, 1999). Dessa forma, o índice de vegetação realça o contraste entre áreas vegetadas e não vegetadas.

### **2.3. Sensoriamento remoto da cultura da cana-de-açúcar**

A cultura da cana-de-açúcar tem sido objeto de estudo de vários trabalhos de sensoriamento remoto em diferentes contextos. Rudorff e Batista (1990) compararam três modelos e apontaram um híbrido resultante da combinação entre um modelo agrometeorológico e um modelo com índice de vegetação como o mais apropriado para tal objetivo. Com o mesmo objetivo, Rudorff e Batista (1991) utilizando dados do sensor *Multispectral Scanner Sensor* MSS/Landsat associados a um modelo agrometeorológico se propuseram a estimar a produtividade de áreas de cana no Estado de São Paulo.

Simões *et al.* (2003) e Pontes *et al.* (2005) estudaram o comportamento espectral-temporal da cultura de cana-de-açúcar em diferentes escalas de análise. Por meio de radiometria de campo, Simões *et al.* (2003) tentaram distinguir o comportamento espectral de diferentes variedades de cana em talhões do município de Araras/SP. No mesmo município, todavia com dados de sensores orbitais, Pontes *et al.* (2005) tentaram associar os dados espectrais a parâmetros agronômicos de 2029 talhões.

Xavier *et al.* (2006) empregaram imagens do sensor MODIS (composições 16 dias de IV) para classificar a cultura da cana-de-açúcar por meio de análise de cluster e métodos de classificação não supervisionada. Já Galvão *et al.* (2005) usaram sensores de resolução hiperespectral para discriminar variedades de cana.

Recentemente, RUDORFF *et al.* (2004a e b) vêm realizando o mapeamento anual da área plantada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul por meio de técnicas de classificação não supervisionada e interpretação visual de imagens dos satélites Landsat e *China-Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS). Os mapas para as safras 2003, 2004, 2005 e 2006 são apresentados no *site* <[www.dsr.inpe/canasat](http://www.dsr.inpe/canasat)>.

### **2.4. Técnicas de detecção de mudança**

Os satélites de sensoriamento remoto, como CBERS, Landsat, Terra e Aqua, têm como principal característica a aquisição de imagens sistemática e repetitiva da superfície da

Terra. Desta forma, é possível identificar mudanças na cobertura da Terra por meio de técnicas de detecção de mudança. Tais técnicas fazem uso de imagens tomadas da mesma área em diferentes períodos e têm como princípio que a mudança na superfície da terra resulta na alteração dos valores de radiância dos *pixels*. Existe uma gama de métodos para detecção de mudança, entre eles destacam-se a diferença e a razão entre bandas e índices de vegetação, análise por componentes principais e de vetores de mudança (MAS, 1999; ZHAN *et al.*, 2002; SILVA, 2004; LUNETTA *et al.*, 2006).

Lyon *et al.* (1998) compararam sete técnicas que fazem uso de índices de vegetação, com base em dados de campo e laboratório, e concluem que a diferença entre imagens NDVI é a mais adequada à detecção de mudanças. Lunetta *et al.* (2006) chegaram à mesma conclusão usando séries temporais de imagens do sensor MODIS/Terra.

- **Limiar de índice de vegetação**

A diferença espectral entre áreas díspares pode ser clara ou sutil em uma imagem de sensoriamento remoto. Fatores como resolução espacial e condições de iluminação influenciam diretamente a distinção destas áreas. A técnica limiar de índice de vegetação consiste em encontrar um limiar, um intervalo de valores de NDVI que diferencie as áreas em uma série temporal de índices de vegetação (XIAO *et al.*, 2005; XIAO *et al.*; 2006; AGUIAR *et al.*, 2006).

- **Álgebra de imagens**

A álgebra de imagens é uma técnica de processamento digital de imagens bastante difundida e consiste em uma operação *pixel a pixel* de aplicação em análises de imagens multiespectrais e/ou multitemporais (CRÓSTA, 1992). Pode ser uma adição ou subtração de imagens e uma razão entre as bandas (p.ex. índices de vegetação), ou ainda, uma subtração de índices de vegetação da mesma área e de diferentes datas.

O intuito da adição de imagens é reduzir os ruídos, redefinir uma nova banda espectral e combinar resultados de outro tipo de processamento. A subtração de imagens visa identificar diferentes tipos de cobertura e detectar padrões de mudança na cobertura do solo (CRÓSTA, 1992; MAS, 1999; MATHER, 1999).

A subtração de índices de vegetação multitemporais de uma mesma área evidencia padrões de mudanças no comportamento da vegetação presente. A cana plantada tem elevados valores de índices de vegetação (p.ex. NDVI) e com a colheita os valores deste índice diminui (LILLESAND e KIEFER, 1999). Subtraindo uma imagem NDVI de uma data qualquer de uma imagem NDVI de uma data anterior (datas num curto intervalo de tempo, i.e, 8 a 15 dias), é possível obter o incremento de área de cana colhida neste período; pois as áreas onde houve uma queda nos valores de índices de vegetação são destacadas.

## **2.5. Colheita da cana-de-açúcar**

A colheita da cana-de-açúcar se estende de abril a novembro e pode ser manual ou mecânica, de acordo com a topografia do terreno e dos recursos disponíveis para se investir no maquinário. Vários fatores agrícolas, ambientais e de saúde pública são influenciados pela colheita da cana (SOUZA *et al.*, 2005) A colheita manual está normalmente associada à queima, que facilita o corte dos colmos e aumenta a segurança dos trabalhadores. A mecânica só pode ser realizada em terrenos com menos de 12% de declividade (UNICA, 2006).

Problemas atmosféricos causados pela queima da cana são apontados por Allen *et al.* (2004) e Lara *et al.* (2005) e em associação com outros problemas de ordem ambiental levaram a legislação paulista a estipular prazos para que o fogo deixe de ser usado no manejo da cana (lei 11.241, de 19/09/2002). Atualmente a fiscalização da queima é feita por meio de visitas de campo e denúncias à secretaria de meio ambiente do estado.

O sensoriamento remoto apresenta-se como uma ferramenta em potencial para fiscalizar da queima da cana-de-açúcar e para tanto a técnica de **M**odelo **L**inear de **M**istura **E**spectral (MLME) é apropriada. Tal técnica tem se mostrado eficiente na detecção de áreas queimadas (SHIMABUKURO *et al.*, 1998a; SHIMABUKURO *et al.*, 1998b; DUARTE *et al.*, 1999; PASTOR, 2002; VALERIANO *et al.*, 2005; ANDERSON *et al.*, 2005; QUINTANO *et al.*, 2006).

## 2.6. Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

O MLME é uma técnica que tem por base a análise *sub-pixel* e parte do princípio que um *pixel* é uma combinação linear da reflectância de diferentes alvos, contendo informação sobre a proporção e a resposta espectral de cada componente dentro do elemento de resolução do sensor (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). Em outras palavras, a resposta de cada *pixel* em um comprimento de onda qualquer pode ser considerada uma mistura das respostas de cada alvo, onde o *pixel* assume um valor na escala de cinza (CROSS *et al.*, 1991; QUARMBY *et al.*, 1992; LOBELL e ASNER, 2004). Lobell e Asner (2004) propõem a seguinte equação para o modelo:

$$? = \sum_{i=1}^m C_i ?_i + e \quad (2.1)$$

em que ? é a reflectância observada do *pixel* em uma banda qualquer,  $C_i$  e  $?_i$  são a fração de cobertura e a reflectância (assinatura espectral conhecida, i. e, *endmember* ou membro de referência), respectivamente, e  $e$  é o erro residual do modelo. Devem-se usar duas restrições na solução da Equação 2.1, a saber: que  $C_i$  tenha valores entre 0 e 1 e que a somatória de  $C_i = 1$  (SHIMABUKURO e SMITH, 1991).

Existem vários métodos para escolha dos *endmembers*, entre os quais destacamos dois: a) uso de assinaturas espectrais contidas em bibliotecas espectrais ou ainda de trabalhos anteriores e b) escolha de *pixels* puros representativos do alvo correspondente ao *endmember* apontado na imagem. Esta escolha é crítica para estimativa correta das proporções dos alvos em cada *pixel* (PASTOR, 2002; QUINTANO *et al.*, 2006).

O MLME modela a combinação da reflectância dos diferentes alvos. Esta combinação se dá em decorrência dos alvos serem menores que o tamanho do *pixel* da imagem do sensor e, também, devido ao posicionamento do *pixel* em relação à localização dos objetos (MATHER, 1999). A importância desta técnica aumenta com o uso de sensores com resolução espacial moderada (p. ex. MODIS) e baixa (p. ex. A*dvanced* V*ery* H*igh* R*esolution* R*adiometer* - AVHRR), onde *pixel* representa a resposta espectral integrada dos diversos alvos nele contido. Em sistemas agrícolas complexos, com distintas

culturas cultivadas em pequenas áreas, o uso do MLME é essencial para estimar com maior precisão a área de cada cultura (PRICE, 2003; QUARMBY *et al.*, 1992).

## 2.7. O Sensor MODIS

O sensor MODIS é um dos principais instrumentos a bordo do satélite *Earth Observing System* (EOS) Terra, lançado em dezembro 1999 e presente também no satélite Aqua, lançado em 2002 pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 2.1 As 19 primeiras bandas estão posicionadas entre 405 nm a 2155 nm do espectro eletromagnético, as bandas 1-7 estão direcionadas para as aplicações terrestres; as bandas 8-16 para as aplicações oceânicas e as bandas 17-19 para as medições atmosféricas. As bandas 20-36, exceto a banda 26 (1360-1390 nm), cobrem a porção termal do espectro (3660nm a 14385nm) e têm aplicações multidisciplinares (ANDERSON *et al.*, 2003; NASA, 2006).

Tabela 2.1 Características gerais do satélite Terra e do sensor MODIS.

Órbita do Satélite Terra	Sol síncrona, quase-polar, descendente, circular, cruza o equador às 10:30 h, horário local.
Altitude do satélite Terra	705km
Largura de imagens MODIS	2230 km ( <i>across track</i> ) e 10 km ( <i>along track</i> e em nadir)
Bandas Espectrais	36 bandas entre 0,405 e 14,385 $\mu\text{m}$
Resolução Radiométrica	12 <i>bits</i>
Resolução Espacial a nadir	250m (bandas 1-2), 500m (bandas 3-7), 1 km (bandas 8-36)
Período de revisita	1-2 dias
Taxa de transferência de dados	11 Mbps

Fonte: adaptado de Justice *et al.*, 2002.

Além das características apresentadas na Tabela 2.1 é importante ressaltar que os dados do sensor MODIS têm alta qualidade radiométrica e geométrica, requisitos importantes

para o monitoramento preciso da cobertura terrestre a fim de observar as mudanças de uso e cobertura do solo (JUSTICE *et al.*, 2002). Devido à largura do campo de visada (2.230 km) o sensor MODIS possui alta resolução temporal (1 ou 2 dias<sup>2</sup>). Por sua vez, a ampla faixa de imageamento compromete a resolução espacial das imagens que é de 250 m, 500 m e 1 km dependendo da banda, conforme indicado na Tabela 2.1. A moderada resolução espacial do MODIS pode limitar o uso dos dados, em aplicações agrícolas e florestais, para grandes áreas (LOBELL e ASNER, 2004; PRICE, 2003; SEDANO *et al.*, 2005; XIAO *et al.*, 2003; XIAO *et al.*, 2005; XIAO *et al.*, 2006).

### 2.7.1. Produtos MODIS

Os dados do sensor MODIS a bordo do satélite Terra são convertidos em três grandes classes de produtos (NASA, 2006), i. e, terrestres, oceânicos e atmosféricos. A classe terrestre (MODLAND) se subdivide em: reflectância e índices de vegetação. Todos os produtos MODIS têm distribuição gratuita via *Internet* através do site <<http://edcdaac.usgs.gov>>.

Os produtos de reflectância são os dados de entrada para gerar vários outros produtos do MODLAND. Eles são uma estimativa da reflectância espectral da superfície para cada banda como se fossem medidos na superfície, sem espalhamento e absorção atmosférica devido à correção atmosférica, e vêm acompanhados pelas informações de qualidade de cada *pixel*, por meio do produto *Quality Assurance* (QA; ROY *et al.*, 2002; JUSTICE *et al.*, 2002; ANDERSON *et al.*, 2003).

Os dados são gerados em diferentes resoluções espaciais e também com diferentes frequências temporais. Composições multitemporais, como o produto MOD09Q1, são formadas por *pixels* selecionados previamente em imagens diárias de reflectância (MOD09GHK), baseada nas melhores observações durante um período de oito dias onde são determinados os *pixels* de melhor qualidade radiométrica e geométrica e livres de nuvens com base no produto QA (JUSTICE *et al.*, 2002; NASA, 2006).

---

<sup>2</sup> Sensor MODIS: Resolução temporal diária em latitudes maiores que 30° e a cada dois dias em latitudes menores que 30°.

As imagens e os produtos MODIS são disponibilizados em forma de *tiles* ou quadrantes (Figura 2.2) com grade de projeção sinusoidal. Cada *tile* cobre uma área de 1200 km por 1200 km (aproximadamente 10° de latitude por 10° de longitude na linha do equador). O calendário para identificação das imagens é o Juliano, com dias do ano representados por algarismos árabes (Anexo A).

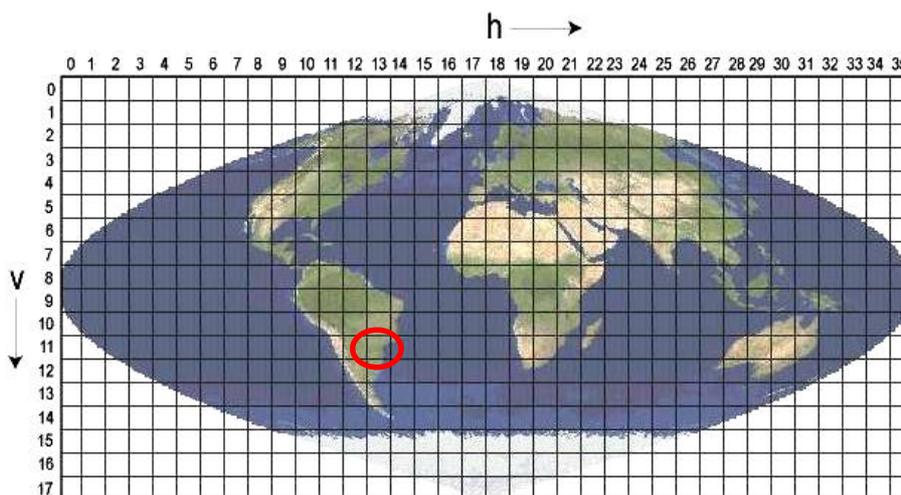


Figura 2.2 - Tiles MODIS (18 x 36) em projeção sinusoidal. Em destaque tile H13V11, que cobre mais do que 97% da área do Estado de São Paulo.

Fonte: NASA (2006).

### 2.7.1.1. Produto MOD13Q1

O produto índices de vegetação (MOD13Q1) contém dois índices produzidos globalmente para a superfície, sejam eles, NDVI e Enhanced Vegetation Index (EVI). Os dados de entrada para geração destes índices são os produtos MOD09A (NASA, 2006). O critério de composição dos *pixels* do produto MOD13Q1 varia em função do número de imagens livres de nuvens disponíveis e está descrito em HUETE *et al.*, 1999. Um dos métodos faz uso do modelo Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF; WALTHALL *et al.*, 1985; Equação 2.2).

$$r_l(\mathbf{q}_v, \mathbf{f}_s, \mathbf{f}_v) = a_l \mathbf{q}_v^2 + b_l \mathbf{q}_n \cos(\mathbf{f}_v - \mathbf{q}_s) + c_l \quad (2.2)$$

em que,  $(r_l)$  é a reflectância das bandas do azul, vermelho e infravermelho próximo (corrigidas atmosféricamente) e em função do ângulo de visada  $(q_v)$ , ângulo solar  $(f_s)$  e azimutal  $(f_v)$ .  $a_1$ ,  $b_1$  e  $c_1$  são os parâmetros do modelo, obtidos utilizando o procedimento de ajuste por mínimos quadrados; e  $c_1$  é igual à reflectância no nadir (HUETE *et al.*, 1999; ANDERSON *et al.*, 2003).

O método alternativo (*backup*) foi proposto por Leeuwen *et al.* em 1996 e denominado Constraint View angle Maximum Value Composite (VC – MVC). Consiste na escolha dos *pixels* com os maiores valores de NDVI e menor ângulo de visada entre as imagens disponíveis. Quando, em um intervalo de 16 dias, existe mais do que 5 imagens sem a presença de nuvens é aplicado o modelo BRDF; por outro lado, quando o número de imagens é menor do que 5 (em decorrência da cobertura de nuvens) utiliza-se o modelo VC – MVC (Figura 2.3).

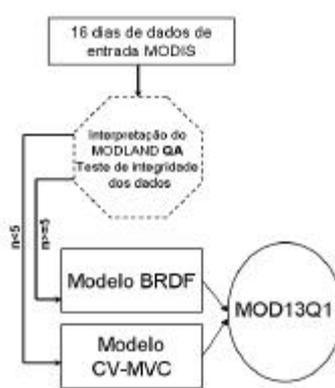


Figura 2.3 - Diagrama do processo de composição do produto MOD13Q1.

Fonte: Adaptado de Huete *et al.* (1999).

Leeuwen *et al.* (1996) comparam os dois modelos e apontam as diferenças. O BRDF normaliza e interpola os valores do IV para o nadir, em outras palavras, os valores do IV *off-nadir* são corrigidos com base na reflectância do nadir. O modelo CV – MVC tem melhor desempenho com dados não corrigidos atmosféricamente, pois ao escolher os *pixels* com os maiores valores de NDVI elimina os *pixels* contaminados. Todavia, Huete *et al.* (1999) alertam para o fato de haver variação nos valores de NDVI em decorrência do ângulo de visada e a escolha destes *pixels* compromete o potencial do IV para

comparações multitemporais. Nesta mesma vertente, Running *et al.* (1994), Leeuwen *et al.* (1996), Huete *et al.* (1999) e Anderson *et al.* (2003) também chamam a atenção para o fato do modelo BRDF não incorporar a variabilidade temporal do ângulo solar, responsável por uma fonte de incertezas no IV. Por fim, Leeuwen *et al.* (1996), corroborados por Huete *et al.* (1999), afirmam que o modelo BRDF é mais apropriado aos dados MODIS.

Em termos práticos, a seleção dos *pixels* em regiões tropicais e subtropicais é condicionada ao método CV – MVC devido à presença constante de nuvens. Trabalhos anteriores tomam tal método como único na composição das imagens multitemporais, pois mesmo que para o cálculo da reflectância seja levado em consideração o modelo BRDF, os *pixels* com maior valor de NDVI dentre as observações disponíveis são eleitos na etapa final de composição (MIURA *et al.*, 2000; GAO e HUETE, 2003; CHUVIECO *et al.*, 2005; ANDERSON *et al.*, 2005; JIN e SADER, 2005).

### 3 MATERIAIS

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados os seguintes materiais: 1) imagens e composições multitemporais do sensor MODIS/Terra; 2) imagens dos sensores TM e CCD, a bordo dos satélites Landsat e CBERS, respectivamente; 3) mapa temático com a distribuição das áreas de cana disponíveis para colheita na safra 2004 para o Estado de São Paulo; 4) mapa das áreas de cana da Usina Catanduva associado às informações sobre data e manejo da colheita. Além destes materiais foram utilizados também o aplicativo SPRING (CÂMARA *et al.*, 1996) e outros *softwares* de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), processamento digital de imagens e pacotes estatísticos. A seguir são detalhados alguns destes materiais, bem como a descrição da área de estudo.

#### 3.1. Área de estudo

O Estado de São Paulo localiza-se aproximadamente entre os paralelos 19° 5' e 25° S. e os meridianos 44° e 53° 5' O. (Figura 3.1), na região sudeste do Brasil, e tem uma área de 248.209,426 km<sup>2</sup>.

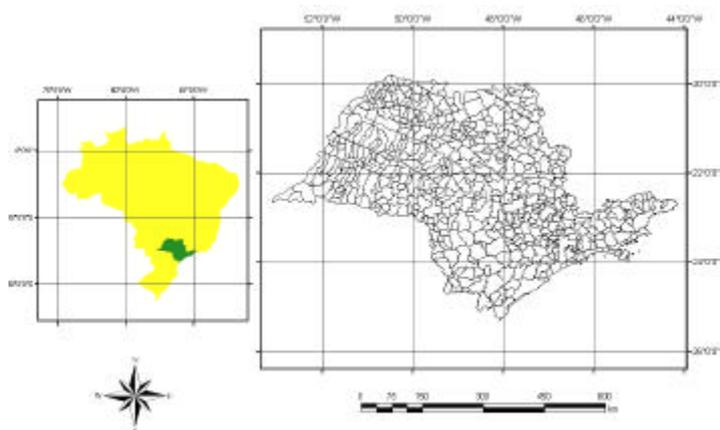


Figura 3.1 Estado de São Paulo no contexto nacional.

O Estado está dividido em cinco grandes províncias geomorfológicas, sejam elas, planalto ocidental, *cuestas* basálticas, depressão periférica, planalto atlântico e a província costeira (PONÇANO, 1981). A cana-de-açúcar está concentrada na região centro-norte e oeste do Estado, com maior área ao longo dos meridianos 46° 30' e 49°

30' e dos paralelos 20° 00' e 21° 50', 22° 20' e 23° 20', sobre o planalto ocidental, as *cuestras* basálticas e a depressão periférica – nas zonas do Mogi-Guaçu e do médio Tietê. As altitudes variam de 200 m a 600 m no planalto ocidental. Nas *cuestras* variam de 600 m a 800 m e no planalto cristalino as altitudes variam de 600 m e alcançam 1000 m na Serra da Bocaina. Na depressão periférica chegam a 800 m e na planície costeira não passam de 100 m (IGG, 1943).

Os solos do Estado de São Paulo pertencem predominantemente à classe dos latossolos e dos argissolos. Os latossolos preenchem grande parte do norte, do leste e do centro do Estado, com algumas manchas de neossolos. O sul é dominado pelos argissolos, latossolos e cambissolos. Os argissolos predominam também no oeste do Estado, onde há ainda uma grande mancha de latossolos na região dos municípios de Araçatuba, Promissão e Penápolis (OLIVEIRA *et al.*, 1999).

O clima do Estado, segundo a classificação climática de Köppen, abrange sete tipos climáticos distintos, que correspondem majoritariamente ao clima úmido. O clima dominante é Cwa, que ocupa toda a parte central do Estado e é caracterizado pelo clima tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno, com a temperatura média do mês mais quente superior a 22° C. As regiões norte e noroeste, mais quentes, pertencem ao tipo Aw, tropical chuvoso com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18° C e precipitação inferior a 60 mm no mês mais seco. No sul do Estado aparecem faixas de clima tropical, do tipo Cfa (CEPAGRI, 2006).

### **3.2. Imagens de sensores orbitais**

Para abranger toda a área do Estado de São Paulo com as imagens MODIS/Terra foram necessários dois *tiles*, a saber: H13V11 e H13V10 (Figura 2.2). As composições multitemporais de NDVI oriundas do produto MOD13Q1 (aqui denominadas MODC) utilizadas são apresentadas na Tabela 3.1. Para criar as composições NDVI propostas neste trabalho (denominadas MODCSH) foram empregadas todas as imagens diárias (MOD09GQK; bandas 1 e 2) desde o dia 81 (21 de março) até o dia 363 (28 de dezembro), totalizando 282 imagens para cada banda. Para identificar o modo de

colheita por meio de MLME foram utilizadas imagens de reflectância diária de 4 bandas (Tabela 3.1).

### 3.3. Imagens TM/Landsat e CCD/CBERS

Também foram utilizadas imagens do sensor TM/Landsat e CCD/CBERS de diferentes datas conforme apresentado na Tabela 3.1. Estas imagens foram utilizadas como dado de referência devido a sua melhor resolução espacial em comparação à resolução espacial das imagens MODIS.

Tabela 3.1 – Imagens de sensores orbitais utilizadas referentes ao ano safra 2004.

Sensor Plataforma	Órbita/Ponto Tile	Produto	Bandas	Dia Juliano
				81
				97
				113
				129
				145
				161
				177
				193
MODIS/Terra	H13V11 e H13V10	MOD13Q1	NDVI	209
				225
				241
				257
				273
				289
				305
				321
				337
				353
MODIS/Terra	H13V11	MOD09GHK	1, 2, 5 e 6	214
				90
				138
				186
Landsat/TM	221/75		3, 4 e 5	218
				234
				266
				282
				330
CCD/CBERS	156/154		2, 3 e 4	151
				203

### **3.4. Mapa de referência**

Para identificar as áreas cultivadas com cana-de-açúcar e garantir que as análises aqui propostas se restringissem a estas áreas, foi utilizado um mapa temático com a distribuição das áreas de cana disponíveis para colheita na safra de 2004, para o Estado de São Paulo, produzido por Rudorff *et al.* (2004b). Vale ressaltar que a metodologia empregada neste trabalho está diretamente condicionada a disponibilidade deste mapa, já que a resolução espacial do sensor MODIS não permite identificar as áreas de cana.

### **3.5. Mapa e dados das áreas de cana da Usina Catanduva**

Para validação das estimativas de área de cana colhida foram utilizadas informações da Usina Catanduva organizadas em um banco de dados espacial/cadastral. Os talhões de responsabilidade da usina estão localizados aproximadamente entre os paralelos 20° 39' e 21° 40' sul e os meridianos 48° 30' e 49° 20' oeste; na região centro-norte do Estado de São Paulo.

Os talhões estão distribuídos em diferentes municípios, a saber: Olímpia, Cedral, Uchoa, Tabapuã, Novaes, Embauba, Paraíso, Elisiário, Catanduva, Palmares Paulista, Monte Azul Paulista, Marapoama, Elisiário, Pindorama, Ariranha, Pirangi, Itajobi, Santa Adélia, Itápolis e Borborama e contam, em sua totalidade, com uma área de aproximadamente 4 km<sup>2</sup>.

Todos os talhões estão georreferenciados e a eles estão associados dados referentes à sua situação; como data de plantio, data de colheita, data do corte atual, tipo do corte, tipo do solo, variedade, produtividade real e área do talhão. O tamanho médio dos talhões é de 9,6 ha, o maior talhão tem 50,8 ha e o menor tem 1,1 ha. São, no total, 1316 talhões sob responsabilidade da Usina Catanduva.

## 4 METODOLOGIA EMPREGADA

Pode-se dividir a metodologia, com vistas a torná-la didática, em etapas; a saber: 1) pré-processamento dos dados de entrada; 2) criação das imagens MODCSH; 3) comportamento do NDVI das áreas de cana-de-açúcar ao longo da safra; 4) técnicas de detecção do corte da cana para estimativa de área, incluindo a definição do limiar de NDVI e a subtração entre composições multitemporais de NDVI; 5) validação e comparação das técnicas de estimativa de área e 6) identificação do modo de colheita. Os principais passos da metodologia são apresentados na Figura 4.1.

### 4.1. Pré-processamento dos dados de entrada

Inicialmente foi criado um banco de dados, em ambiente SIG, contendo todas as imagens utilizadas. A projeção cartográfica adotada neste banco foi a Policônica e o datum planimétrico foi o SAD69.

Os processos necessários, prévios à inserção das imagens no banco de dados, foram a reprojeção das imagens para a projeção adotada, a união (mosaico) dos *tiles* e a conversão da extensão das imagens de *Hierarchy Data Format* (\*.HDF) para \*.GeoTIFF. Para tanto foi utilizada a ferramenta *MODIS Reprojection Tool* (MRT), disponibilizada gratuitamente no site da *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC; <http://edcdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis>).

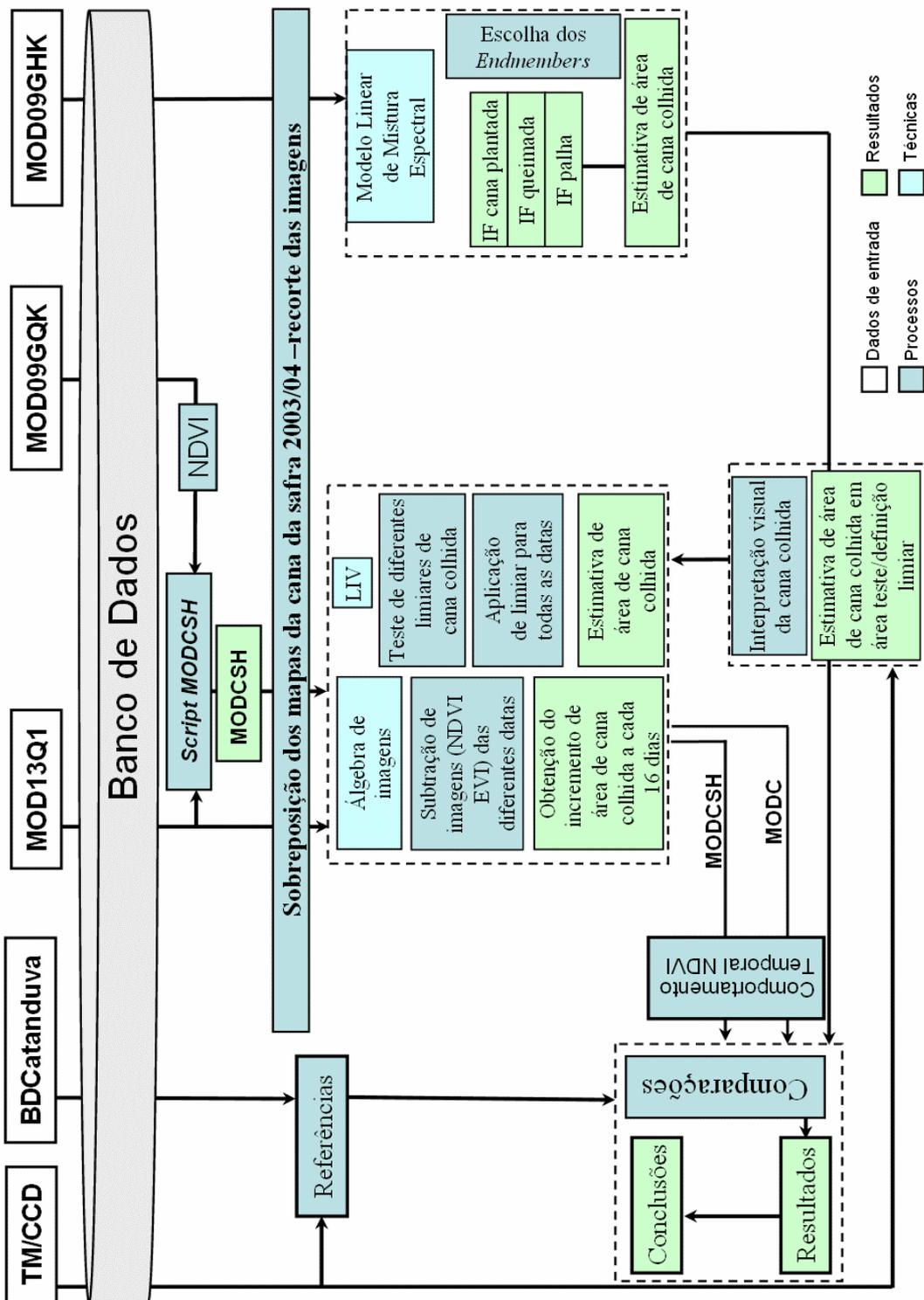


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia empregada – principais passos realizados

O ponto de partida para realizar o experimento foi o recorte de todas as imagens utilizadas, por meio de um *script* em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL), com o intuito de garantir que as análises subseqüentes estivessem restritas às áreas cultivadas com cana. Para cumprir tal objetivo, foi empregado o mapa produzido por Rudorff *et al.* (2004b; Figura 4.2). Este mapa apresenta a área de cana plantada da safra de 2004 e possui diversas classes: Cana 2004, Cana 2004-Planta/Reforma 2003, Cana 2004-Planta/Expansão 2003, Cana Reforma 2004 e Outros. Foram mantidas, como máscara para o recorte, somente as classes referentes às áreas que foram colhidas na safra em questão, i e., Cana 2004; Cana 2004 Planta/Reforma 2003; Cana 2004 Planta/Expansão 2003, convertidas em uma única classe denominada *Cana 2004*.

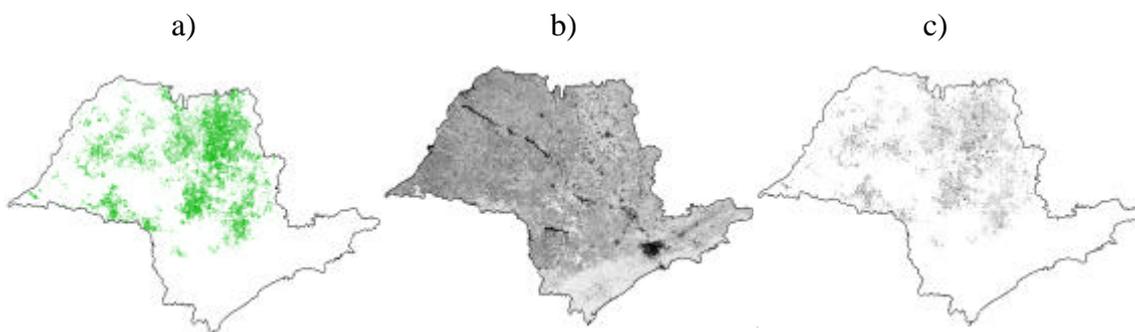


Figura 4.2 - Mapa com as áreas de cana no Estado de São Paulo (Rudorff *et al.* 2004b) – safra 2004 (a); composição 16 dias de NDVI iniciada no dia 24 de maio de 2004 (b) e recorte das áreas de cana para mesma composição (c).

Para converter as imagens diárias (MOD09GQK; bandas 1 e 2) em imagens NDVI foi necessário, primeiramente, convertê-las em imagens de reflectância. Estas imagens são de reflectância de superfície, no entanto, reescaladas por um fator de escala. Dividindo o valor de cada um dos *pixels* da imagem por 10000 obteve-se a reflectância. Em seguida, foram geradas imagens NDVI para todos os dias julianos compreendidos na safra, i. e., 81 a 363.

## 4.2. Criação das imagens MODCSH

As imagens para detecção e monitoramento do corte da cana foram geradas por um *script* em LEGAL (Apêndice A) e com o uso das imagens MODC e de reflectância diária. Este *script* substituiu um dos critérios de seleção dos *pixels* adotados pela NASA na composição dos produtos MOD13Q1 e descritos na seção 2.7.1.1. Em vez de selecionar os *pixels* com os maiores valores de NDVI (CV - MVC; LEEUWEN *et al.*, 1996; GAO e HUETE., 2003) foram selecionados os *pixels* de uma faixa de valores de NDVI que representavam as áreas de cana-de-açúcar colhida, i.e., valores compreendidos entre 0,15 e 0,40.

A definição deste limiar foi baseada na análise de *pixels* “puros”, em outras palavras, com sua área ocupada inteiramente por cana e compreendido, em sua totalidade, dentro de um único talhão (seção 4.3). A avaliação do comportamento do NDVI de cada um destes *pixels* durante toda a safra permitiu o estabelecimento do limiar.

O propósito da mudança de critério para seleção dos *pixels* foi melhorar a precisão temporal das estimativas de área de cana colhida. Pois, desta forma, evitou-se que os *pixels* com altos valores de NDVI de imagens diárias, referentes aos dias considerados nas composições de 16 dias, fossem selecionados em detrimento aos *pixels* com valores dentro da faixa desejada; protelando a identificação das áreas de cana colhida. Em suma, privilegiou-se a escolha dos *pixels* de interesse.

Para evitar que *pixels* com valores de NDVI espúrios (ruídos, presença de nuvens e faixas não imageadas) fossem selecionados, optou-se por considerar também, no momento da escolha de um *pixel* ( $P_{XY}$ , por exemplo), os valores deste mesmo *pixel* em datas consecutivas. A observação dos valores de NDVI nestes dias permitiu estabelecer um acréscimo no valor de NDVI para tais dias, ou seja, foi considerada a possibilidade de aumento do índice por mudanças na área.

A título de exemplo o *pixel*  $P_{XY}$  referente a uma composição hipotética MODC, iniciada no dia 01 e terminada no dia 16. O primeiro passo foi verificar o valor deste *pixel* na MODC. Quando seu valor estava compreendido dentro da faixa de interesse, ele era

considerado um *pixel* de cana colhida e portanto, não era alterado (Figura 4.3c). Por outro lado, quando  $P_{XY}$  tinha valor fora do limiar de interesse (acima de 0,40) ele possivelmente era alterado. Foram três as possibilidades de mudança descritas a seguir.

Na primeira possibilidade (Figura 4.3a), o valor de NDVI de  $P_{XY}$  da MODC era 0,74 e correspondia à imagem do primeiro dia. O valor compreendido no limiar foi encontrado na imagem do dia 06 e então foram verificados os valores das duas datas seguintes. Confirmada a inclusão dos valores de NDVI destas duas datas no limiar, o valor de  $P_{XY}$  no dia 06 substituiu  $P_{XY}$  na composição MODC; formando a composição MODCSH.

A segunda possibilidade ilustra a presença de ruídos nas imagens diárias (Figura 4.3b). Assim como na primeira possibilidade, o valor de  $P_{XY}$  na MODC corresponde ao NDVI do dia 01. Apenas no dia 10 foi encontrado um valor dentro do limiar de interesse, entretanto, ao observar os valores de NDVI dos dois dias seguintes verificou-se que o NDVI do dia 12 não estava dentro do limiar. Assim o valor de NDVI de  $P_{XY}$  da MODC foi mantido para composição MODCSH.

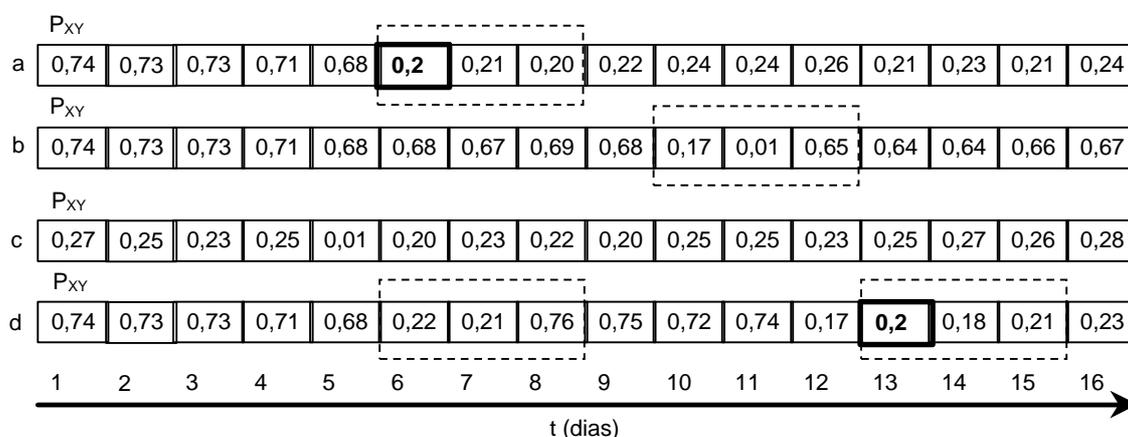


Figura 4.3 - Esquema da janela temporal aplicada para a escolha de *pixels* representativos de áreas colhidas. Valores de NDVI dentro do limiar de interesse (a); presença de ruídos nas imagens diárias (b); todos os valores de NDVI compreendidos no limiar de interesse (c); ruídos e valores de colheita no mesmo intervalo de 16 dias (d).

A terceira possibilidade é a existência de ruídos e a evidência de colheita no mesmo intervalo de 16 dias (Figura 4.3d). Os valores de NDVI, compreendidos no limiar, encontrados nos dias 06 e 07 foram descartados, já que o valor do dia 08 estava fora do

limiar, todavia, novamente foi encontrado um valor de NDVI dentro da faixa de interesse no dia 13 e nos dois dias seguintes permitindo a substituição do valor de NDVI de  $P_{XY}$  em MODC pelo valor de NDVI do dia 13.

Vale ressaltar que o tamanho da janela temporal utilizada no algoritmo para composição das imagens MODCSH foi definido por meio da análise dos valores diários de NDVI. A frequência dos ruídos e dos valores espúrios de forma geral foi um dos critérios, bem como a taxa de aumento nos valores de NDVI para as áreas colhidas.

#### **4.3. Comportamento do NDVI das áreas de cana-de-açúcar ao longo da safra**

De posse das imagens MODC, MODCSH e de reflectância diária, e a fim de embasar as análises subseqüentes, foram criados gráficos da evolução temporal do NDVI durante a safra. Para criação destes gráficos foram escolhidos 51 *pixels* “puros”.

Foram estabelecidos dois critérios para seleção destes *pixels*: que os mesmos estivessem contidos na classe *Cana 2004* e que mais que 90% da área de cada um destes *pixels* estivessem inseridas em um único talhão. Para o atendimento do primeiro critério foi criado um arquivo vetorial com formato de grade e com resolução de 250 m por 250 m sobre toda a área dos talhões da usina Catanduva. Esta grade foi registrada com as imagens MODIS e os limites de suas células passaram a corresponder aos limites dos *pixels* das imagens supracitadas.

Em seguida, foi realizada uma consulta espacial e foram mantidas apenas as células sobre a classe *Cana 2004*. Todavia, este procedimento ainda não garantia que os *pixels*, limitados pelo vetor das células, pudessem ser considerados “puros”, pois um *pixel* podia estar entre talhões distintos e com diferentes datas de colheita o que resultaria em uma mistura de respostas espectrais distintas (cana colhida e cana não colhida). A fim de evitar tal mistura, foram selecionados apenas *pixels* que respondiam simultaneamente aos dois critérios; aos quais foram atribuídos identificadores.

Para cada *pixel selecionado* foi gerada uma tabela, em planilha eletrônica, com os valores de NDVI para todas as datas das imagens analisadas, i. e, para as imagens de

reflectância diária foram 10 valores e para as imagens MODC e MODCSH foram 17 valores. A partir destes valores foram gerados gráficos com o comportamento do NDVI durante toda a safra e calculados valores máximos, mínimos e médios para cada um dos *pixels*. Vale ressaltar que para os gráficos das imagens diárias também foram plotados valores de NDVI correspondentes às imagens MODC do início da safra (dias julianos 81, 97, 113, 129), pois a primeira imagem diária livre de nuvens corresponde ao dia 158 (06/06/2004).

#### **4.4. Técnicas de detecção do corte da cana para estimativa de área**

Para estimar a área de cana colhida foram utilizadas duas técnicas de detecção de mudança, ambas aplicadas sobre composições multitemporais de 16 dias (MODC e MODCSH). Vale ressaltar que, levando em consideração a escala adotada no presente trabalho, o uso de imagens diárias para estimativa da área colhida tornou-se inviável na medida em que não foram encontradas imagens de todo o Estado, sem a presença de nuvens, em intervalos de tempo curtos e regulares.

- **Limiar de NDVI**

Para aplicar um limiar de índice de vegetação que discriminasse as áreas colhidas das áreas não colhidas, o primeiro passo foi interpretar visualmente as imagens CCD/CBERS e identificar as áreas de cana-de-açúcar, além de discriminá-las quanto ao seu estado, i. e, colhido ou não-colhido. Estas áreas serviram como referência para o estabelecimento do limiar.

As áreas testes foram eleitas por meio da análise de imagens CCD/CBERS da órbita/ponto 156/124 (Figura 4.4). O critério adotado para sua escolha foi à presença maciça de áreas cultivadas com cana em tais imagens. Por meio da justaposição das imagens CCD/CBERS e MOD13Q1 (Figura 4.5) foi possível verificar quais eram os valores de NDVI de cada um dos *pixels* da imagem MODIS/Terra contidos nos talhões colhidos e não colhidos de referência.

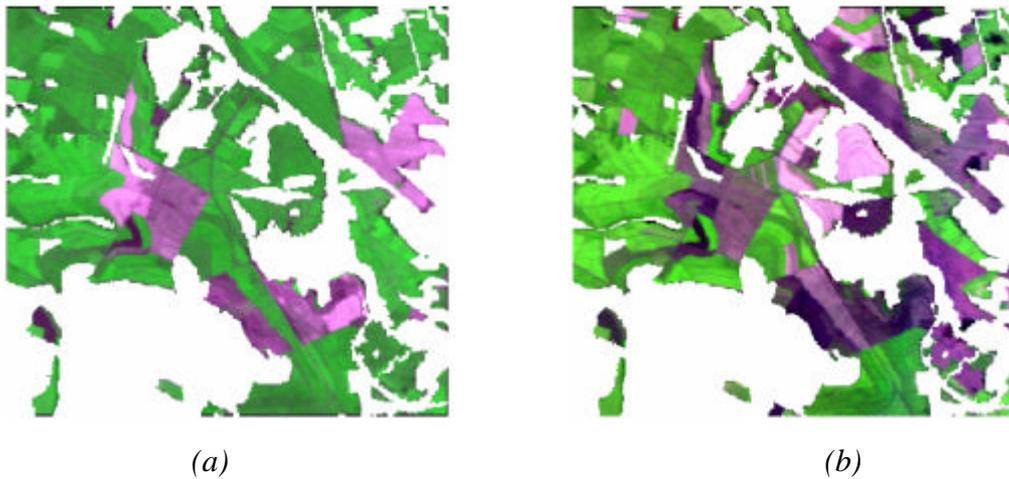


Figura 4.4 - Exemplos de Imagens do sensor CCD do satélite CBERS - 2 órbita 156 ponto 124, adquiridas em 30/05/2004 (a) e 21/07/2004 (b) sobre área teste de 50 km<sup>2</sup>, com sobreposição do tema não-cana em cor branca. As áreas de cana não colhida se apresentam em tons de verde enquanto que as áreas de cana colhida se apresentam em tons de roxo nesta composição falsa cor (2R4G3B).

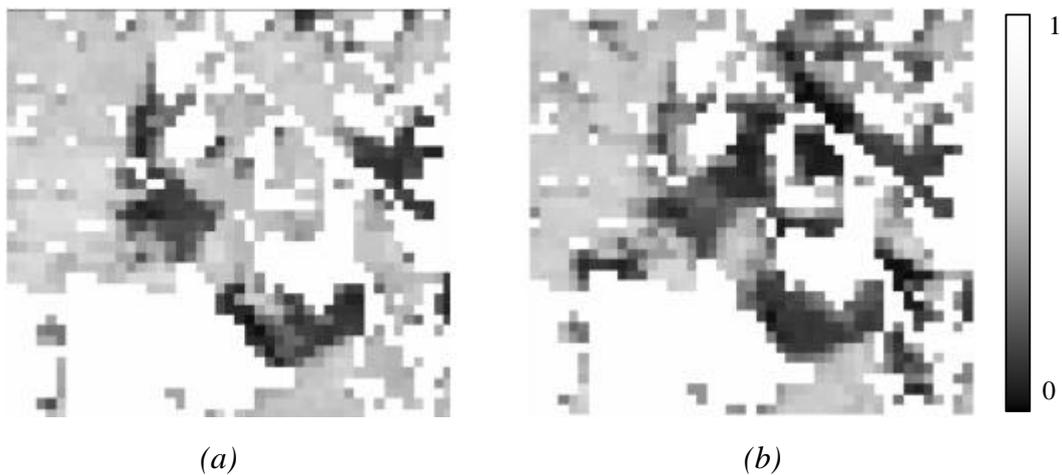


Figura 4.5 - Imagens NDVI/MODIS adquiridas em 09/06/2004 (a) e 27/07/2004 (b) sobre área teste de 50 km<sup>2</sup>, com sobreposição do tema não-cana em cor branca. As áreas de cana em pé se apresentam em tons de cinza claro enquanto que as áreas de cana colhida se apresentam em níveis de cinza escuro.

Uma análise do valor médio do NDVI das duas classes (colhida e não-colhida) permitiu estabelecer o limiar que seria aplicado para diferenciá-las. Aplicado o limiar de fatiamento, foi efetuada uma análise visual da imagem resultante. Testados vários limiares foi eleito o que melhor discriminasse as áreas de cana colhida, ou seja, sempre

que o NDVI de um *pixel* atingiu valor igual ou inferior ao valor do limiar selecionado, num determinado período, o *pixel* foi classificado como *cana colhida*.

Em síntese, com a definição do limiar de NDVI foram obtidos mapas temáticos com a área de cana colhida em intervalos de 16 dias (para as composições MODC e MODCSH), durante todo o período de colheita da cultura.

Após a criação dos mapas de cana colhida, para cada uma das datas, foi elaborado um único mapa temático (Figura 4.6), no qual cada classe representava a cana colhida nos diferentes períodos de análise. Ressalta-se que a correta seleção dos *pixels* que representam as áreas de cana colhida foi feita em ordem cronológica, ou seja, uma vez que o *pixel* foi classificado como *cana colhida* ele não participava mais da seleção em datas subseqüentes.

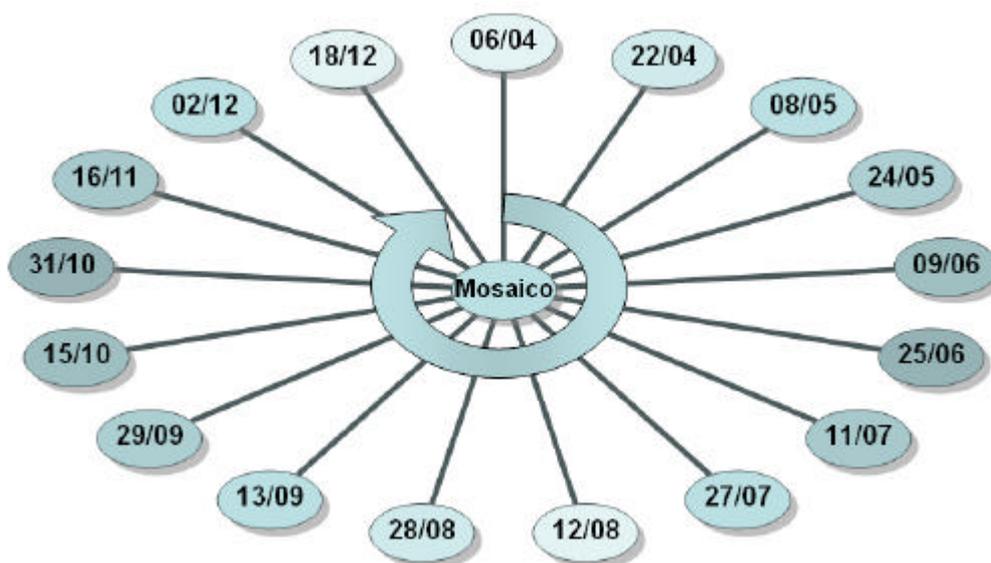


Figura 4.6 - Representação esquemática da geração do mapa temático da colheita com as diferentes datas das imagens MOD31Q1 e MODCSH utilizadas na análise.

Fonte: Aguiar *et al.* (2006).

- **Subtração entre composições multitemporais de NDVI**

Para a aplicação desta técnica também foram utilizadas as composições 16 dias (MODC e MODCSH). Por meio de um *script* em LEGAL foi realizada uma subtração de imagens, de acordo com a Equação 4.1.

$$Data_{t+1} - Data_t = imagem_{diferença} \quad (4.1)$$

A partir das imagens diferenças foram obtidas imagens de diferença percentual (Equação 4.2). Para estas imagens os valores dos *pixels* correspondem, em percentagem, à diminuição ou aumento de NDVI e, em última instância, a perda ou ganho de biomassa.

$$\left( \frac{imagem_{diferença} * 100}{Data_t} \right) * -1 \quad (4.2)$$

A criação das *imagens diferenças percentuais* teve como objetivo evitar que talhões de cana não colhida com baixos valores de NDVI (p.ex., áreas de cana de 4º ou 5º corte) fossem selecionados como talhões colhidos.

Por fim, foi possível estabelecer um limiar de queda de NDVI, aplicado a estas imagens, que representasse a colheita da cana-de-açúcar. Com base na comparação das imagens fatiadas e de imagens de sensores de média resolução espacial (TM e CCD) foram testados diversos limiares e selecionados aqueles que melhor discriminaram as áreas de cana colhida; aplicados a todas as composições da safra.

Assim como na técnica apresentada anteriormente, após a criação dos mapas de cana colhida para cada uma das datas foi elaborado um único mapa temático, onde as classes representavam a cana colhida nos diferentes períodos de análise. O mesmo cuidado foi tomado na elaboração do mapa multitemporal a fim de garantir que *pixels* classificados como cana colhida não participassem da seleção em datas subsequentes.

#### 4.5. Validação e comparação das técnicas de estimativa de área

Para validar as técnicas de estimativa de área aplicadas sobre as imagens MODC e MODCSH foram utilizados os dados da usina Catanduva e o conjunto de 51 *pixels* selecionados anteriormente, além da área de cana colhida apontada por Rudorff *et al.* (2004b) em nível estadual e municipal. Dentre os 51 *pixels* selecionados previamente, 9 foram excluídos da validação por não conterem informação sobre a data da colheita, restando 42 *pixels*.

As datas de colheita foram inseridas em classes de datas a fim de ajustá-las à escala de análise das técnicas/resolução temporal MODIS (Tabela 4.1). As datas estimadas para os *pixels* analisados foram comparadas com as datas de referência, tornando possível avaliar e comparar a qualidade das estimativas.

Tabela 4.1 Ajustes das escalas para validação das técnicas de estimativa.

Composições 16 dias MODCSH e MODC	
Classe	Data
097-112	data1
113-128	data2
129-144	data3
145-160	data4
161-176	data5
177-192	data6
193-208	data7
209-224	data8
225-240	data9
241-256	data10
257-272	data11
273-288	data12
289-304	data13
305-320	data14
321-336	data15
337-352	data16
353-364	data17

As classes correspondem às composições nas quais a cana colhida foi identificada. Cada classe é composta por 6 dígitos, os três primeiros correspondem ao dia Juliano de início da composição e os três seguintes ao último dia. Tomando um exemplo hipotético, de acordo com a referência, a cana do talhão “x” foi colhida no dia Juliano 170

(18/06/2004) e então classificada como colhida na data 5 (Tabela 4.1), o que pode estar ou não de acordo com a estimativa que aponta a colheita do referido talhão.

A validação das estimativas de datas de colheita foi realizada com base em análise de regressão linear simples. Foram efetuados três testes, com nível de significância de 1%, com vistas a verificar a igualdade dos conjuntos de dados, sejam eles:

- teste F, para  $\beta_1 = 0$  (relação linear entre as datas estimadas e de referência), neste caso, a hipótese nula deve ser rejeitada;
- teste t para  $\beta_0 = 0$  (reta da regressão passando na origem) e para  $\beta_1 = 1$  (reta da regressão com 45° de inclinação). A hipótese nula do teste t para os parâmetros da regressão deve ser aceita para atestar a igualdade estatística dos dados.

Em suma, a razão em testar se  $\beta_0 = 0$  e  $\beta_1 = 1$  é que a aprovação destas duas condições indica que a linha de regressão ajustada pode passar pela origem e apresentar declividade de 45°.

#### **4.6. Identificação do modo de colheita**

Para identificar do modo de colheita foi empregado o MLME sobre imagens diárias de reflectância utilizando um *software* de processamento digital de imagens. Foram escolhidos três *endmembers* com base nos valores de reflectância das bandas 1, 2, 5 e 6 do sensor MODIS/Terra (dia 226, 13/08/2004), a saber: cana (para áreas com cana em pé), palha (para áreas colhidas sem uso do fogo) e queima (para áreas colhidas com uso do fogo). Os *pixels* das bandas 5 e 6 foram reamostrados para 250 m, com o uso do *software* MRT, a fim de ajustá-los ao tamanho dos *pixels* das bandas 1 e 2.

Na primeira etapa do experimento as imagens MODIS/Terra foram recortadas, mantendo apenas as áreas de cana dos talhões de responsabilidade da Usina Catanduva. Para auxiliar na escolha dos *endmembers* foi utilizada uma imagem do sensor TM/Landsat adquirida no dia 218 (05/08/2004; bandas 3, 4 e 5 e órbita/ponto 221/75). Tal tarefa pressupôs a escolha de grandes áreas representativas dos alvos de interesse em ambas as imagens, a fim de garantir que a diferença entre as resoluções espaciais

não impedissem a escolha de *pixels puros* como *endmembers* (HAERTEL e SHIMABUKURO, 2005). Em síntese, o curto intervalo de tempo entre as datas de aquisição das imagens dos dois sensores e o co-registro entre elas permitiu encontrar as áreas potenciais para a escolha dos *endmembers*.

O processo seguinte foi analisar a resposta espectral de cada um dos alvos selecionados em cada uma das bandas, a fim de garantir que as respostas dos alvos sejam dispare e, conseqüentemente, obter um melhor resultado com a aplicação do modelo. Foram geradas 4 novas imagens, denominadas: fração cana, fração palha, fração queima e erro.

Os valores dos *pixels* de cada uma das imagens fração indicam a proporção do *endmember* contido nos mesmos. Valores acima de 1 indicam *endmembers* mais puros do que os escolhidos para aplicação do modelo. Sendo assim, as imagens resultantes foram analisadas, em associação com a imagem erro, e serviram de guia para a escolha de novos *endmembers* com o objetivo de melhorar o modelo. Este processo se repetiu até que se alcançasse o menor número de valores de *pixels* acima de 1 nas imagens fração.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Evolução temporal do NDVI das áreas de cana

Com o intuito de estabelecer os valores de NDVI representativos das áreas de cana colhida, foram gerados gráficos da evolução temporal deste mesmo índice para *pixels* “puros” selecionados de acordo com critérios descritos na seção 4.3 (Figura 5.1). Em adição, foram geradas curvas com a porcentagem de variação de NDVI entre as datas compreendidas na safra. A análise das curvas de NDVI permitiu estabelecer a data (ou intervalo de dias) em que a cana foi colhida.

A Figura 5.1 apresenta, a título de exemplo, os valores de NDVI para alguns *pixels* (representados pelas diferentes cores). As datas de colheita deste conjunto de *pixels* estão restritas ao mês de junho e são passíveis de serem identificadas em decorrência da queda significativa nos valores de NDVI. Os *pixels* 390009, 374360, 374976 e 377030 têm uma queda de NDVI de aproximadamente 60%, enquanto o valor do *pixel* 374517 reduz cerca de 75%.

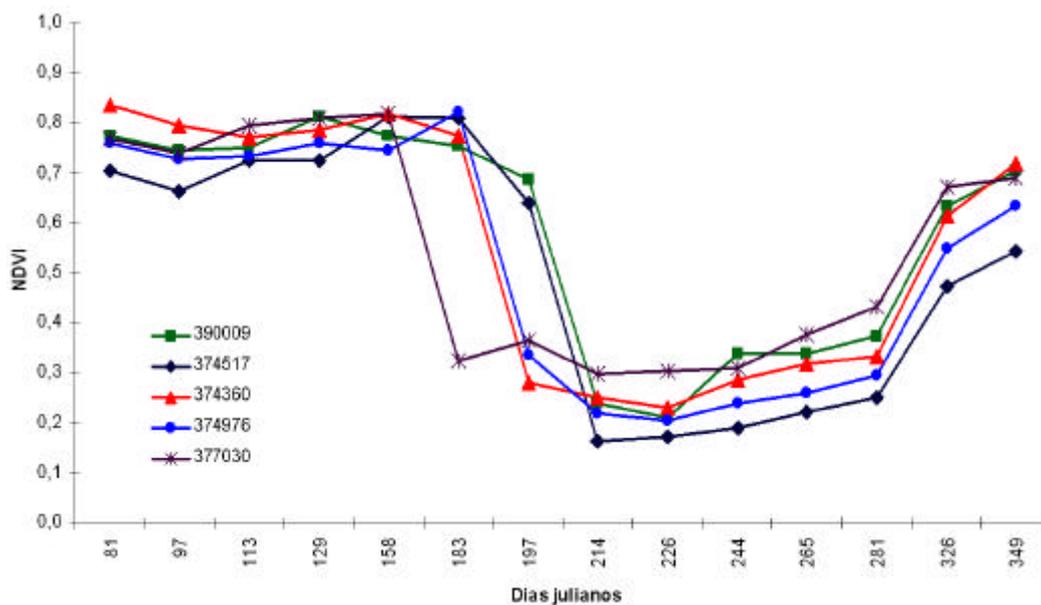


Figura 5.1 - Evolução temporal do NDVI em imagens diárias de áreas de cana-de-açúcar com colheita no mês de junho, safra 2004.

Um outro grupo de *pixels* é apresentado na Figura 5.2. As datas de colheita das áreas destes *pixels* estão concentradas nos meses de abril (*pixel* 394568, 391907 e 395770) e maio (*pixel* 382768, 381066); no início da safra. As quedas nos valores de NDVI estão entre 22,3% (382768), passando por 31,46% (391997) e alcançando 65,7% (394580).

As possíveis datas de colheita, indicadas pela queda no valor de NDVI, estão de acordo com as datas indicadas pela Usina Catanduva. O *pixel* 391997 não tem informação sobre sua data de colheita, porém foi possível afirmar que a área de tal *pixel* foi colhida entre os dias 113 e 129, pois houve uma queda de 39,71% em seu valor de NDVI.

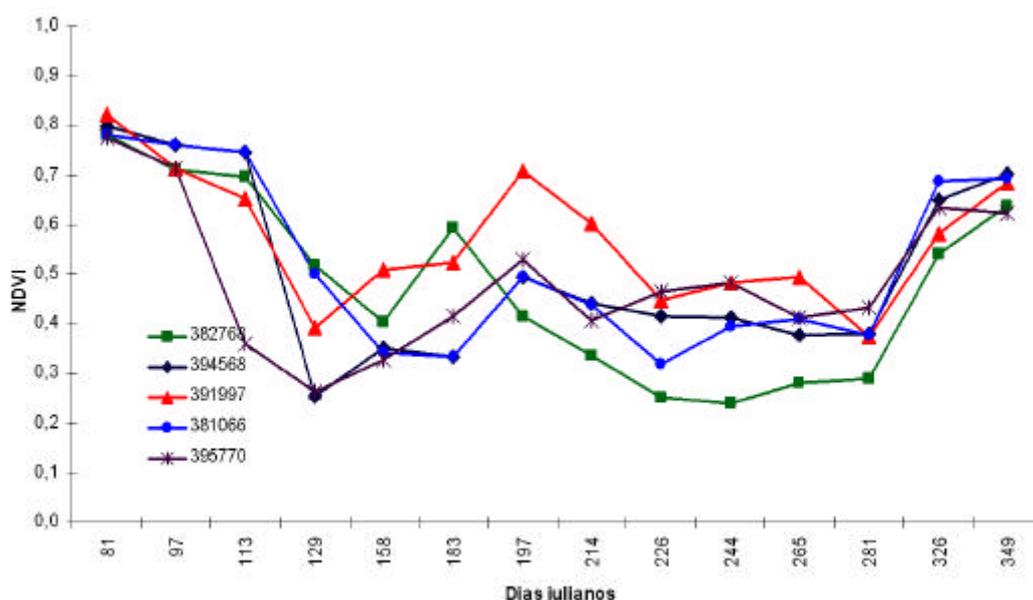


Figura 5.2 - Evolução temporal do NDVI em imagens diárias de áreas de cana-de-açúcar com colheita nos meses de abril e maio, safra 2004.

A evolução dos valores de NDVI dos *pixels* apresentados na Figura 5.3 difere dos anteriores. Não há quedas bruscas no índice de vegetação (em média, menores do que 30%), o que impede a exata identificação das datas de colheita. A análise das datas de referência, para os talhões que contêm estes *pixels*, indica datas de colheita concentradas nos meses de outubro (*pixels* 377921 e 389508), novembro (*pixel* 498558 e 375818) e dezembro (*pixel* 389478). Este fato pode estar relacionado com a condição do talhão, idade (vezes em que foi “replantada”) ou ainda variedade da cana.

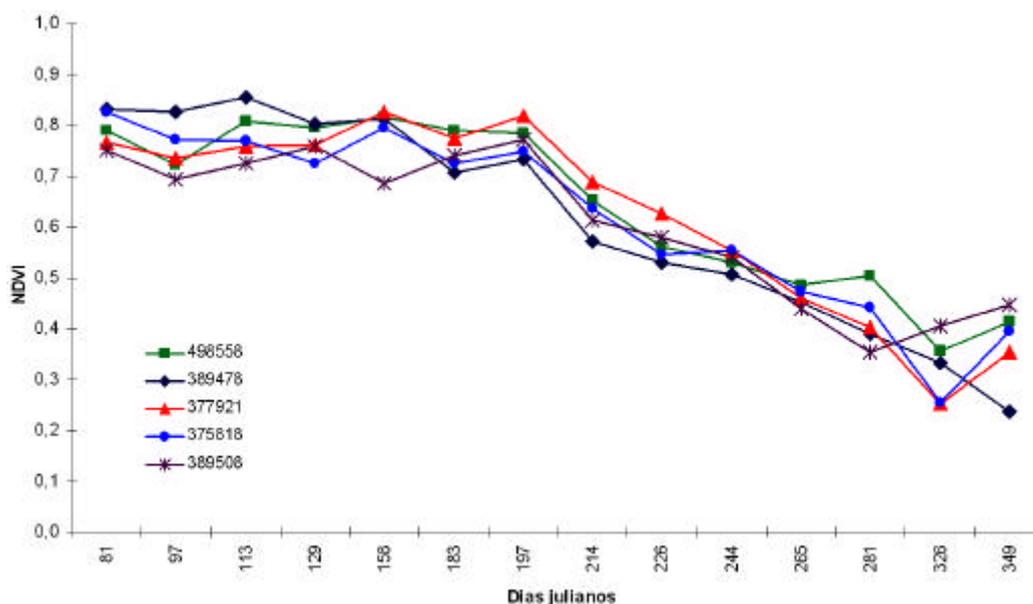


Figura 5.3 - Evolução temporal do NDVI em imagens diárias de áreas de cana-de-açúcar com colheita nos meses de outubro, novembro e dezembro, safra 2004.

Uma diferença importante pode ser apontada se traçarmos um paralelo entre os resultados obtidos neste trabalho e os resultados alcançados por Pontes et al. (2005). Os valores mínimos de NDVI das áreas colhidas identificadas neste trabalho não são, em hipótese alguma, iguais ou menores do que zero, ao contrário dos valores apresentados pelos autores supracitados que usaram dados do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) para acompanhar a evolução de talhões de cana em um município do Estado de São Paulo.

## 5.2. Avaliação das composições MODCSH

Os valores mínimos e máximos de NDVI para o conjunto de *pixels* (51, no total) das imagens diárias são apresentados na Figura 5.4. Os valores mínimos correspondem às áreas onde a cana foi colhida, com NDVI entre 0,15 e 0,40. Os valores máximos indicam áreas de cana em pé com altos valores de NDVI, em torno de 0,75 e 0,90. A análise deste gráfico permitiu estabelecer a faixa de valores de NDVI (entre 0,15 e 0,40)

a qual os *pixels* das imagens diárias deveriam pertencer para substituir<sup>3</sup> os *pixels* da composição MODC no processo de composição da MODCSH.

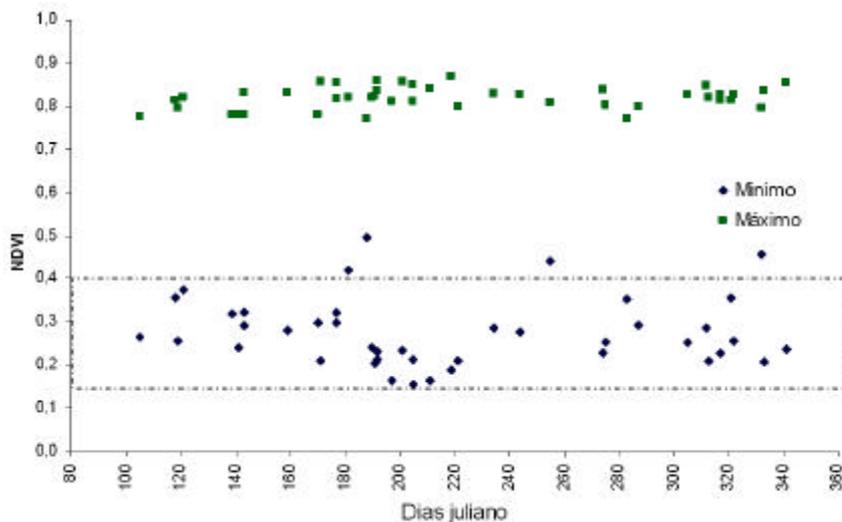


Figura 5.4 - Valores máximos e mínimos de NDVI dos 51 *pixels* puros durante a safra de 2004.

A mudança dos critérios de seleção dos *pixels* adotados para composição NDVI 16 dias da NASA altera os valores dos *pixels* destas imagens. Na Figura 5.5 é apresentada parte da área do Escritório de Desenvolvimento Regional (EDR) de Ribeirão Preto na composição MODC iniciada no dia 225 (12/08/2004), a composição MODCSH equivalente e também a área em que os *pixels* foram substituídos (em azul), ou seja, as áreas onde os valores de NDVI são diferentes nas duas composições.

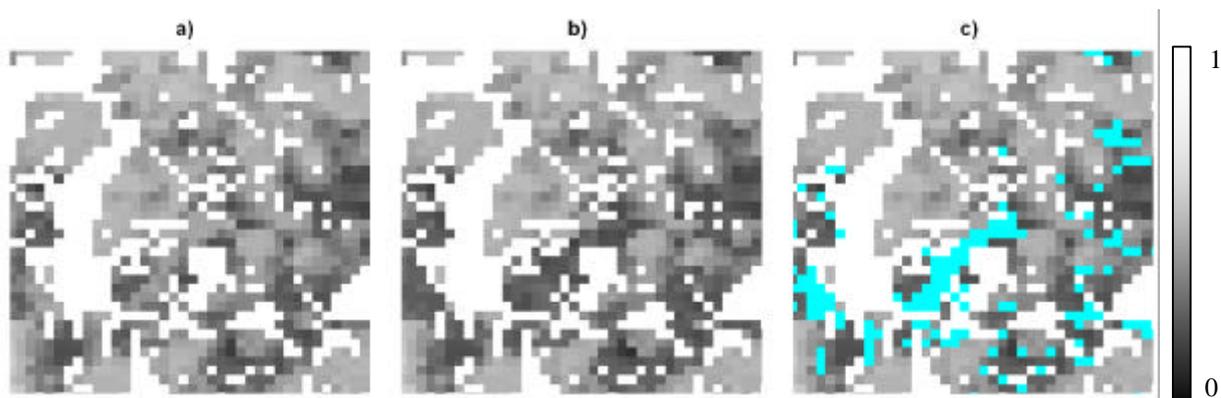


Figura 5.5 - Imagens MODC (a), MODCSH (b) e fatiamento da diferença entre elas em azul (c) com sobreposição do tema *não cana*.

<sup>3</sup> Seguindo os critérios estabelecidos na seção 4.2

As áreas com menores níveis de cinza correspondem aos menores valores de NDVI, i.e., área colhida. Nota-se que os *pixels* alterados, em geral, circundam estas áreas. Este fato foi verificado na maioria das áreas das imagens analisadas e indica que a colheita da área de cana coberta por tais *pixels* se deu em dias subsequentes aos dias de colheita das áreas mais escuras na imagem MODC, ou seja, talhões próximos colhidos em curtos intervalos de tempo não puderam ser identificados nas composições MODC devido ao critério de escolha dos *pixels*. Por outro lado, as imagens MODCSH tornam estas áreas evidentes.

Esta mesma ordem de idéias é apresentada por Chuvieco *et al.* (2005) em seu trabalho de mapeamento de áreas queimadas, no qual alertam para a escolha de *pixels* de áreas de contato entre queima e não queima, de *pixels* de dias anteriores à queima e até mesmo para seleção de *pixels* contaminados com nuvens em detrimento aos *pixels* de áreas queimadas (baixos valores de NDVI).

Alguns exemplos que ilustram a capacidade de identificar talhões colhidos nas imagens MODCSH (num total de 36 *pixels* alterados dos 51 avaliados) são apresentados na Figura 5.6. É possível observar que em todos os casos, para as composições MODCSH, a identificação das áreas destes *pixels* como *colhidas* ocorreu em datas anteriores, o que está de acordo com as datas de referência. Para outra série de *pixels* analisados (15 restantes) não houve substituição de valores e o comportamento foi o mesmo para as duas composições em questão.

A análise da mesma Figura permitiu enfatizar outro ponto importante no processo de composição das imagens MODCSH, a saber: a janela temporal impediu que valores espúrios fossem eleitos para substituir valores fora da faixa de interesse. Todas as curvas correspondentes às imagens MODCSH foram sobrepostas às curvas das imagens MODC até o momento da colheita e, além disto, picos de valores de NDVI depois da colheita foram eliminados (Figura 5.6b e Figura 5.6d).

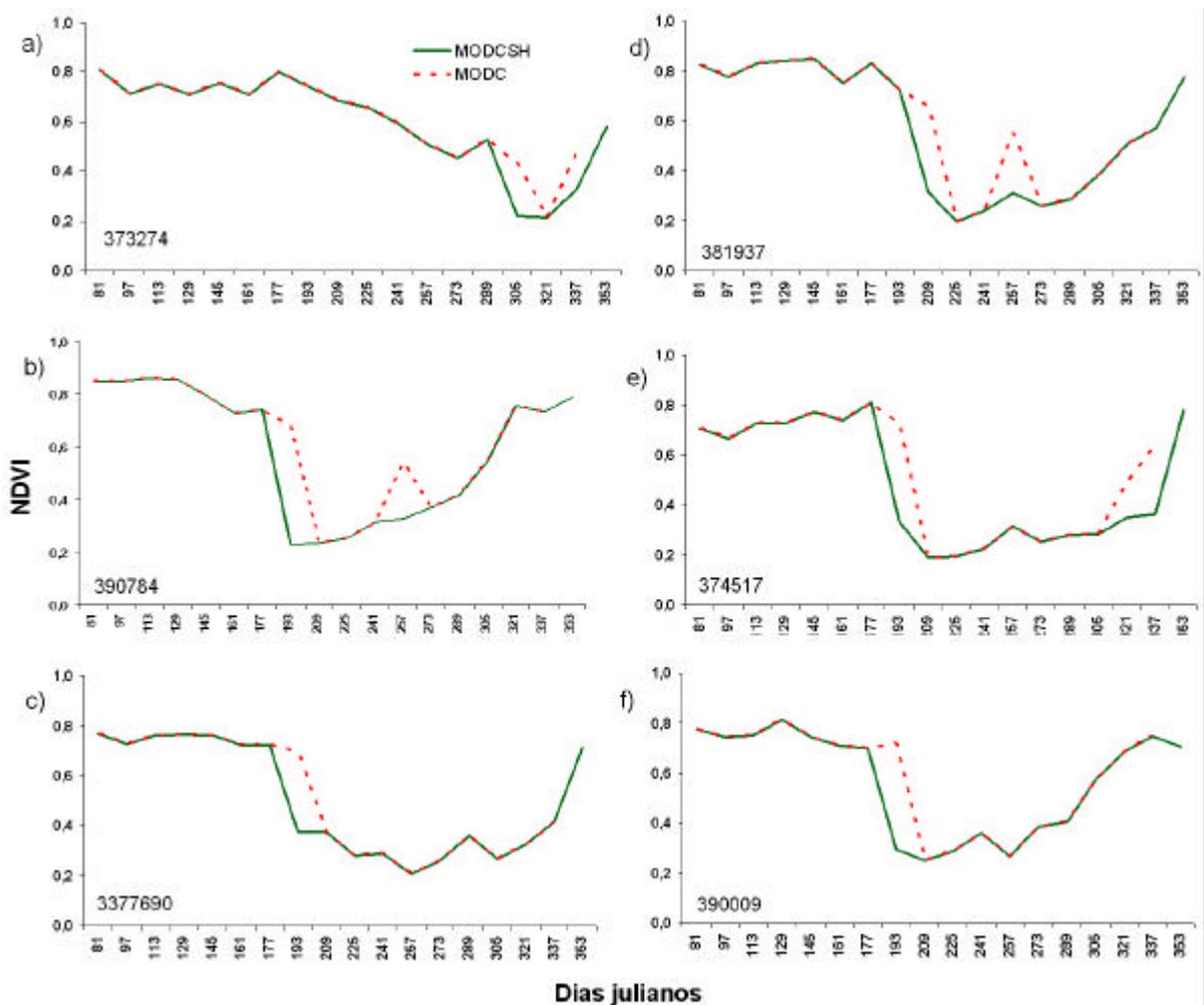


Figura 5.6 - Evolução temporal do NDVI de *pixels* puros de cana em imagens MODCSH e MODC na safra 2004. Na abscissa os dias julianos correspondem à data de início da composição.

Um outro enfoque para correção dos dados MODIS foi apresentado por Lunetta *et al.* (2006) que eliminou *pseudo* picos e quedas de NDVI com o uso do produto de avaliação de qualidade (*QA flags*) em associação com o método de transformada de Fourier. Tais ruídos foram definidos, com base em uma série temporal, como mudanças repentinas nos valores de NDVI que, em seguida, retornavam aos valores prévios, assim como apresentado nas figuras supracitadas.

### 5.3. Avaliação da área estimada por meio de limiar de índice de vegetação

O limiar de NDVI definido para o fatiamento das imagens foi  $o < 0,538$ . Dessa forma, os talhões com valores de NDVI menores que o limiar estabelecido foram considerados colhidos. A Figura 5.7 ilustra a evolução da colheita, resultante da aplicação desta técnica nas composições MODCSH e MODC.

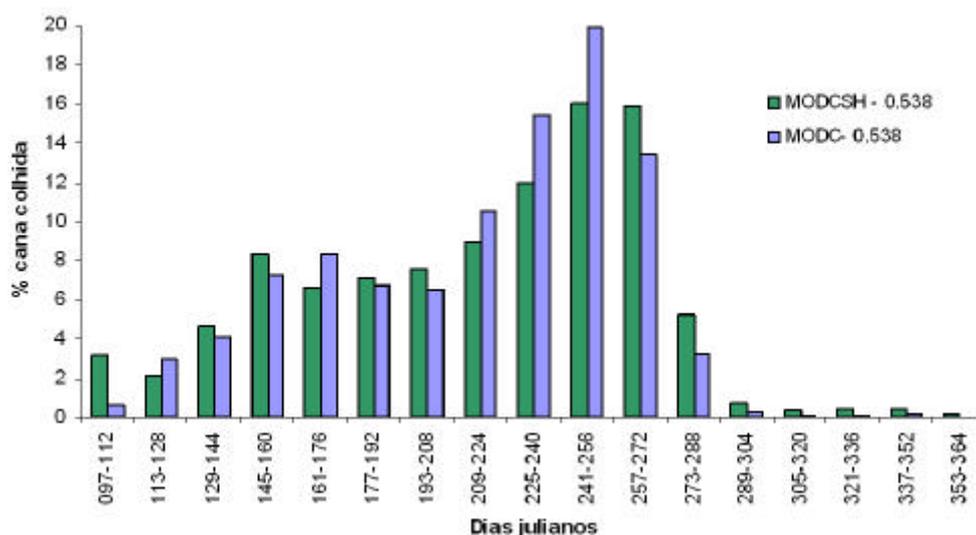


Figura 5.7 - Evolução da colheita resultante da aplicação de limiar de índice de vegetação sobre composições MODCSH e MODC.

Identificam-se três períodos distintos na atividade de colheita, a saber: um período inicial, do início de abril (dia 97) até final de julho (dia 208), caracterizado pelo aumento gradual da atividade; um período intermediário, do final de julho (dia 209) até final de setembro (dia 272), caracterizado pelo aumento expressivo da atividade de colheita e um último período, iniciado no final de setembro (dia 273) e caracterizado pela queda brusca da colheita.

O período intermediário coincide com a época seca, onde as chuvas de longa duração são escassas. Neste período, para as atividades de colheita, as máquinas e os trabalhadores têm acesso facilitado aos talhões. Nos meses de outubro, novembro e dezembro a frequência das chuvas de longa duração é maior e a dificuldade de acesso aos talhões aumenta. Na safra em questão, o aumento das precipitações de longa duração na segunda quinzena de setembro impediu a colheita (AGUIAR *et al.*, 2007).

Esta periodicidade é constatada em ambas as composições multitemporais, todavia, nas estimativas baseadas nas composições MODCSH o percentual de área de cana colhida no período intermediário é menor. A possibilidade de encontrar *pixels* com altos valores de NDVI no início da safra causou a identificação tardia dos talhões de cana colhida nas imagens MODC e, conseqüentemente, o acúmulo da área colhida em curtos intervalos de tempo.

O limiar de NDVI aplicado subestimou a área colhida em 2,87 para a composição MODCSH e 5,80% para composição MODC (Tabela 5.1). Estes valores foram calculados tomando como referência a área a ser colhida ao final da safra de 2004, indicada por Rudorff *et al.* (2004b). Entretanto, é sabido que nesta safra sobraram aproximadamente 4% de cana no campo (cana bisada) em decorrência das chuvas (UNICA, 2006; AGUIAR *et al.*, 2006; AGUIAR *et al.*, 2007). Partindo de tal premissa, a estimativa sobre as composições MODC subestimou a área em 1,80% e a estimativa com base na composição MODCSH superestimou a área em 1,13%.

Tabela 5.1 - Área estimada de cana colhida absoluta e percentual em intervalos de análise (16 dias); total ao final da safra e comparação com referência.

Períodos	MODCSH		MODC	
	Estimativa (ha)	%	Estimativa (ha)	%
097-112	88.684	3,16	17.091	0,63
113-128	60.021	2,14	80.253	2,95
129-144	131.257	4,68	111.453	4,10
145-160	232.472	8,28	198.425	7,29
161-176	186.266	6,64	226.458	8,32
177-192	200.345	7,14	183.508	6,74
193-208	212.284	7,56	178.987	6,58
209-224	251.268	8,95	288.268	10,59
225-240	334.480	11,92	418.851	15,39
241-256	451.638	16,09	542.344	19,93
257-272	446.267	15,90	367.116	13,49
273-288	147.755	5,26	89.660	3,29
289-304	21.510	0,77	7.525	0,28
305-320	11.328	0,40	3.715	0,14
321-336	12.140	0,43	2.563	0,09
337-352	12.864	0,46	4.080	0,15
353-364	5.825	0,21	1.234	0,05
<b>Total</b>	2.806.404	100	2.721.531	100
<b>Mapa referência</b>	2.889.181	-2,87	2.889.181	-5,80

A precisão temporal do limiar de índice de vegetação aplicado às composições MODCSH e MODC pode ser avaliada através de gráficos de dispersão. A reta traça a situação ideal quando as datas estimadas são iguais às datas de colheita (Tabela 4.1). Pontos acima da reta indicam que as áreas dos *pixels* foram identificadas como *colhidas* antes da colheita e, ao revés, pontos abaixo da reta significa que tais áreas foram identificadas como *colhidas* somente após a colheita.

Nota-se, por meio da análise da Figura 5.8a, que as áreas colhidas no início da safra (até a data 8 – dia 224) foram identificadas corretamente ou majoritariamente 16 dias após a colheita. Em seguida, as áreas com colheita em datas correspondentes ao meio/fim da safra (12 a 15) foram identificadas como *colhidas* previamente (círculo vermelho), em geral, nas datas 10, 11 e 12 (entre os dias 241 e 288). Estes resultados estão de acordo com a Figura 5.7, pois indicaram que a área colhida foi superestimada nestes períodos.

Imagens de média resolução espacial permitiram verificar as condições dos *pixels* contidos nos talhões 1, 2 e 3 (Figura 5.8) erroneamente estimados. Estes *pixels* corresponderam a talhões em más condições, conseqüentemente, seus respectivos valores de NDVI alcançaram o limiar estabelecido para fatiamento antes da data da colheita. Nas Figuras 5.12a e 5.12b é notória a influência do solo na resposta espectral dos *pixels* em questão. O *pixel* apresentado na Figura 5.12c localiza-se na borda de dois talhões com respostas espectrais diferentes. Conseqüentemente, o erro de estimativa pode ter sido resultante da mistura das duas respostas espectrais.

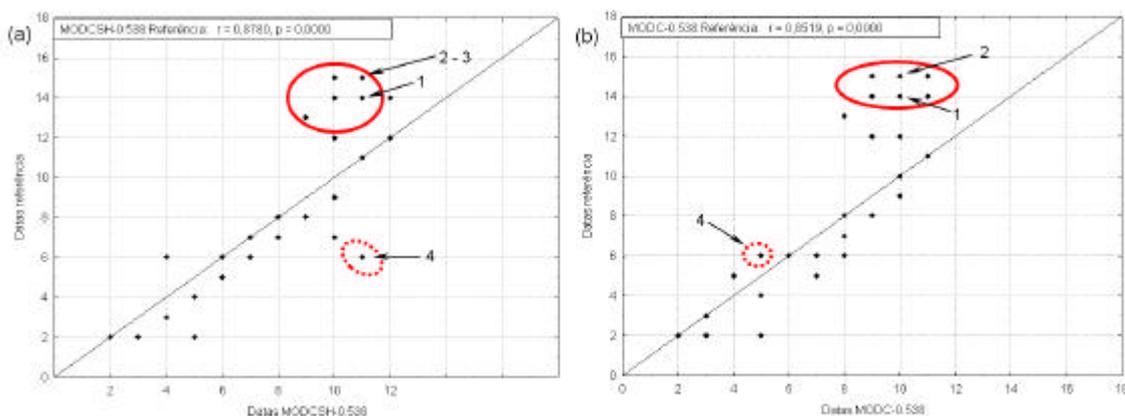


Figura 5.8 - Gráfico de dispersão para limiar de 0,538 aplicado sobre composições MODCSH (a) e MODC (b).

A data de colheita indicada pela referência para o *pixel* contido no talhão 4 (Figura 5.8; círculo pontilhado vermelho) foi 06/07/2004 (data 6), contudo a imagem TM do dia 218 (05/08/2004) evidencia que a cana de tal talhão ainda não havia sido colhida (Figura 5.12e). Apenas na imagem adquirida no dia 282 (08/10/2004) pôde-se constatar a colheita da área em questão. Com o uso das imagens MODC o mesmo talhão foi identificado erroneamente como colhido na data 5.

#### **5.4. Estimativa de área colhida por limiar de perda de biomassa**

Foram estabelecidos dois limiares de perda percentual de biomassa:  $> 25\%$  e  $> 23\%$ ; com base na diferença percentual entre duas composições NDVI das áreas de cana sabidamente colhidas. A diferença entre estes limiares e o percentual médio de perda de biomassa do conjunto de *pixels* puros (aproximadamente 48%) está justamente no fato de tais *pixels* serem puros (ver seção 4.3) e, em função da baixa resolução espacial das imagens do MODIS/Terra, boa parte dos *pixels* das imagens conterem informação da energia refletida, tanto de cana colhida, quanto de cana não-colhida, em diferentes proporções.

Estudos anteriores corroboram a existência deste efeito de “esmaecimento” ou diminuição dos contrastes entre as áreas em imagens de sensores de resolução espacial moderada, ascendente em áreas menores (LOBELL e ASNER, 2004; JIN e SADER, 2005; TAN *et al.*, 2006). Uma outra possibilidade de explicação está relacionada ao tamanho da faixa de imageamento do sensor MODIS. Freitas *et al.* (2005) realizaram um experimento em uma área desértica e correlacionaram a distância do nadir com o desvio padrão (DP) dos valores de reflectância da banda 1 e 2 do sensor MODIS. Os valores de DP diminuíram com a distância em resposta ao aumento do tamanho dos *pixels* e da mistura espectral.

A Figura 5.9 apresenta a evolução da colheita na safra de 2004 para ambos os limiares e as composições multitemporais. Quanto às composições é perceptível a diferença entre os percentuais intervalares de área de cana colhida. Até o final de agosto (dia 241) o percentual destas áreas foi maior para as estimativas baseadas nas composições MODCSH. Nos dois períodos seguintes houve uma inversão destes valores e em

seguida um equilíbrio até o final da safra. Este comportamento foi similar para os dois limiares. Novamente, a capacidade de tornar evidente o contraste entre as áreas *colhidas* e *não colhidas* em diferentes datas foi o fator preponderante para o aumento da área estimada e a distribuição destas áreas ao longo da safra nas composições MODCSH.

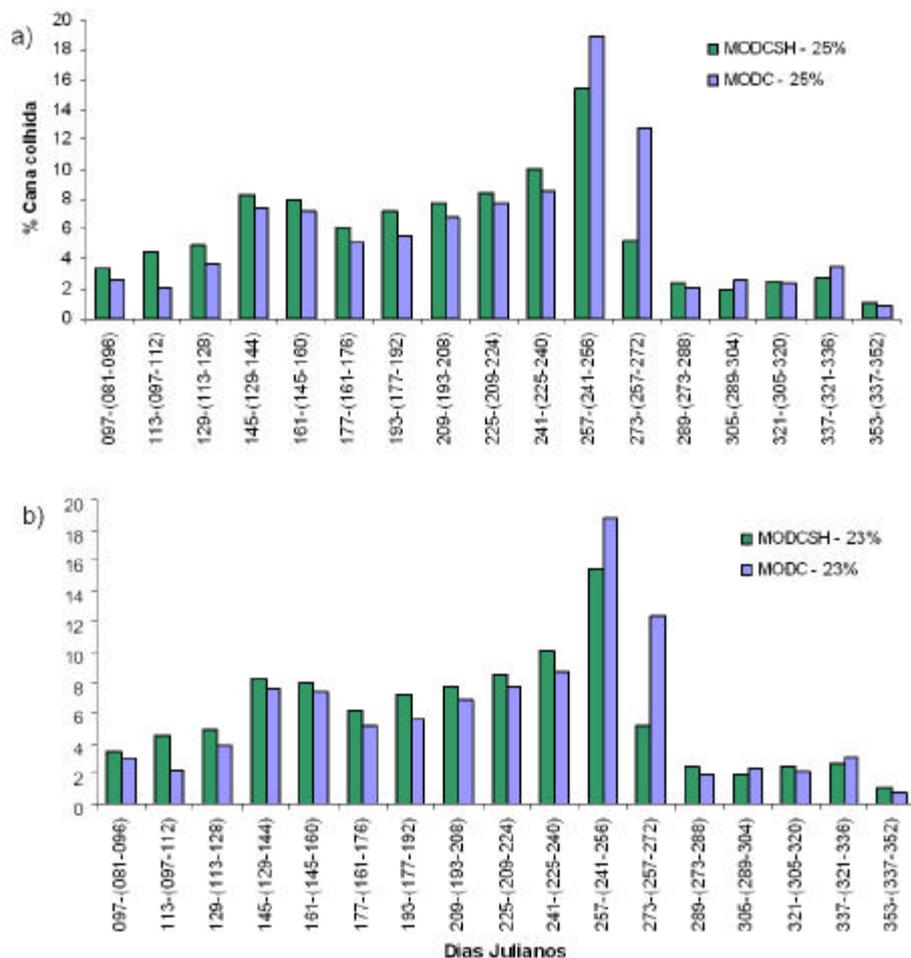


Figura 5.9 - Fatiamento com limiar de 25% (a) e 23% (b) de perda percentual de biomassa, aplicado sobre imagens proporção MODCSH e MODC.

As curvas de evolução da colheita tiveram o mesmo comportamento, contudo os montantes de área colhida foram ligeiramente maiores para o limiar de 23% (Tabela 5.2 e Tabela 5.3), já que tal limiar é mais amplo. O uso das composições MODCSH gerou uma subestimação da área colhida de 6,24% e 4,76%, para os limiares de 25% e 23% respectivamente. Desconsiderando a área de cana bisada estes valores reduzem para 2,24% e 0,76%.

Tabela 5.2 - Área estimada de cana colhida absoluta e percentual em intervalos de 16 dias com limiar de 25% e comparação com referência.

Períodos	MODCSH		MODC	
	Estimativa (ha)	%	Estimativa (ha)	%
097-(081-096)	81.745	3,02	65.323	2,61
113-(097-112)	125.061	4,62	52.201	2,09
129-(113-128)	127.246	4,70	93.388	3,74
145-(129-144)	218.845	8,08	186.423	7,46
161-(145-160)	209.255	7,72	181.455	7,26
177-(161-176)	164.315	6,07	128.763	5,15
193-(177-192)	195.157	7,20	139.946	5,60
209-(193-208)	209.539	7,74	168.351	6,74
225-(209-224)	231.131	8,53	193.526	7,74
241-(225-240)	273.961	10,11	214.028	8,56
257-(241-256)	410.287	15,15	472.229	18,89
273-(257-272)	135.872	5,02	318.826	12,76
289-(273-288)	73.056	2,70	52.496	2,10
305-(289-304)	56.659	2,09	65.304	2,61
321-(305-320)	75.669	2,79	59.889	2,40
337-(321-336)	84.239	3,11	86.669	3,47
353-(337-352)	36.931	1,36	20.786	0,83
<b>Total</b>	<b>2.708.967</b>	<b>100</b>	<b>2.499.605</b>	<b>100</b>
<b>Mapa referência</b>	<b>2.889.181</b>	<b>-6,24</b>	<b>2.889.181</b>	<b>-13,5</b>

Tabela 5.3 - Área estimada de cana colhida total e percentual em intervalos de 16 dias com limiar de 23% e comparação com referência.

Períodos	MODCSH		MODC	
	Estimativa (ha)	%	Estimativa (ha)	%
097-(081-096)	94.043	3,42	77.791	3,00
113-(097-112)	123.184	4,48	58.006	2,24
129-(113-128)	134.865	4,90	101.026	3,90
145-(129-144)	228.404	8,30	197.770	7,64
161-(145-160)	220.319	8,01	193.513	7,47
177-(161-176)	167.936	6,10	134.475	5,19
193-(177-192)	197.071	7,16	146.105	5,64
209-(193-208)	213.008	7,74	177.551	6,86
225-(209-224)	232.963	8,47	201.296	7,77
241-(225-240)	278.105	10,11	226.156	8,73
257-(241-256)	424.997	15,45	487.511	18,82
273-(257-272)	143.473	5,21	319.405	12,33
289-(273-288)	67.363	2,45	50.463	1,95
305-(289-304)	52.736	1,92	62.143	2,40
321-(305-320)	68.629	2,49	56.961	2,20
337-(321-336)	74.189	2,70	80.517	3,11
353-(337-352)	30.325	1,10	19.180	0,74
<b>Total</b>	<b>2.751.609</b>	<b>100</b>	<b>2.589.869</b>	<b>100</b>
<b>Mapa referência</b>	<b>2.889.181</b>	<b>-4,76</b>	<b>2.889.181</b>	<b>-10,4</b>

Ao aplicar o limiar de 23% nas composições MODCSH, os montantes de área colhida por período não ultrapassaram 15,5%. Entretanto para composições MODC, o montante do final de agosto e início de setembro chegou a aproximadamente 19%. O período compreendido entre os dias 257 e 272 apresentou maior discrepância entre as estimativas baseadas nas diferentes imagens, alcançando 12,33% para as composições MODC e apenas 5,21% para as composições MODCSH. Tal diferença está diluída em períodos anteriores e indicou, de acordo com a UNICA (2006) e o CTC (2006), uma evolução mais condizente com a realidade.

Os gráficos de dispersão referentes aos limiares aplicados sobre as *imagens diferença percentuais* são apresentados nas Figuras 5.10 e 5.11. É possível notar que os pontos estão mais próximos da reta ideal em relação aos gráficos de dispersão anteriormente apresentados. O limiar de 25%, mais restritivo, apresentou o melhor desempenho quanto à precisão temporal e aplicado às composições MODCSH foi ainda melhor, quando comparado às composições MODC.

Os *pixels* contidos nos talhões identificados pelos números 2 e 3 (Figura 5.12c e Figura 5.12b, respectivamente) também tiveram suas datas de colheita erroneamente estimadas em decorrência de suas características, descritas anteriormente. O *pixel* contido no talhão identificado pelo número 5 denuncia um problema na composição das imagens utilizadas para estimativa. A colheita deste talhão foi realizada no dia juliano 118 (27/04/2004), fato corroborado pela imagem TM/Landsat adquirida no dia 138 (17/05/2004; Figura 5.12f), e tanto nas composições MODCSH, quanto nas composições MODC, os valores de NDVI para tal área não são menores do que 0,7 até o dia 167 (15/06/2004). Vale ressaltar também que este pixel não foi estimado com o limiar de 25% aplicado às composições MODC (Figura 5.10a).

Ainda em relação às mesmas figuras, a data de colheita da área do *pixel* contido no talhão identificado pelo número 6, apontada pela referência, é o dia 341 (06/12/2004), contudo a imagem do sensor TM/Landsat adquirida no dia 330 (25/11/2004) acusou a colheita de tal área (Figura 5.12d). As composições MODCSH apontaram a data correta

de colheita com ambos os limiares, ao contrário das composições MODC que estimaram a data de colheita tardiamente.

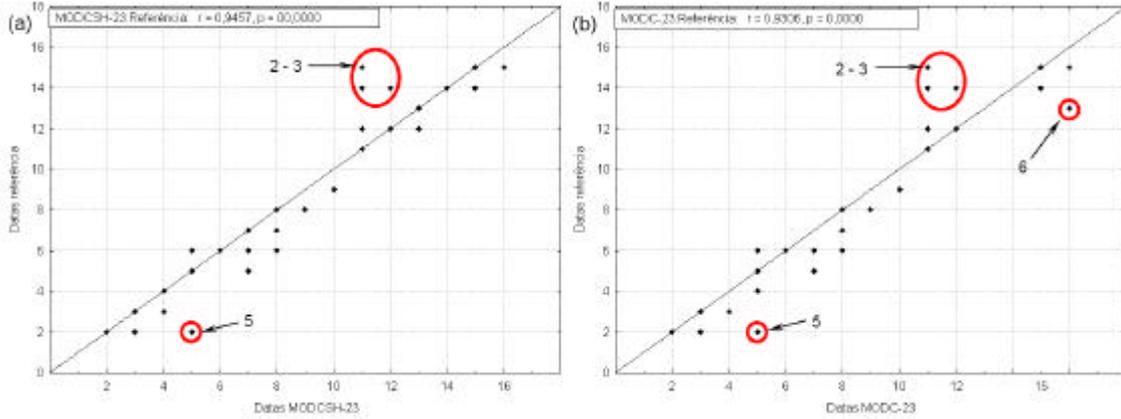


Figura 5.10 - Gráfico de dispersão para limiar de 23% aplicado sobre composições MODCSH (a) e MODC (b).

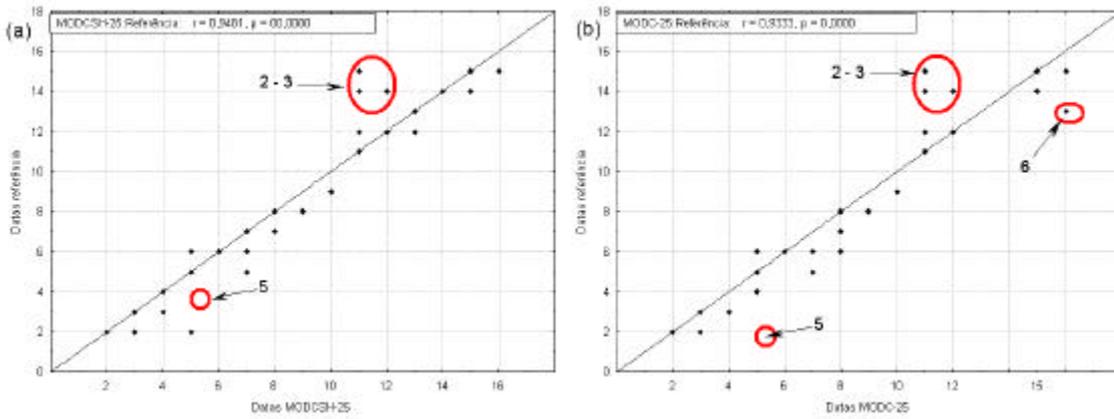


Figura 5.11 - Gráfico de dispersão para limiar de 25% aplicado sobre composições MODCSH (a) e MODC (b).

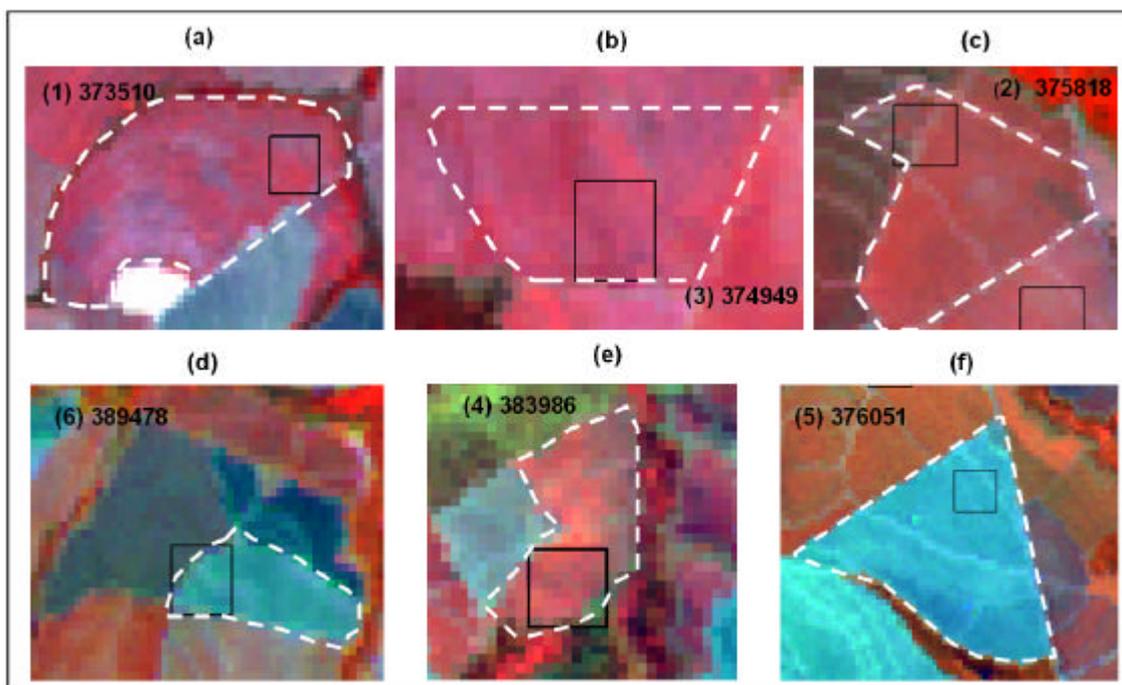


Figura 5.12 - Imagens TM/Landsat de órbita 221 e ponto 75, adquiridas no dia 282 (08/11/2004 - a), dia 330 (25/11/2004 - b, c, d); dia 218 (05/08/2004 - e); dia 138 (17/05/2004 - f); composição 3B 4R 5G.

Para a análise em nível municipal também foi tomado como base à área apontada por Rudorff *et al.* (2004b). Neste caso, as discrepâncias entre a área colhida estimada e a referência se tornaram-se mais evidentes. A Figura 5.13 ilustra a relação entre a área de referência, a área estimada com limiar de 25% de perda de biomassa aplicado sobre as composições MODCSH e o erro relativo percentual de estimativa. É possível observar uma relação direta entre a área de referência e a área estimada e uma relação inversa entre a área de referência e o erro da estimativa, ou seja, quanto menor a área de cana no município, maior o erro relativo da estimativa de área de cana colhida.

A Figura 5.13 também evidenciou que os erros de estimativa não ultrapassaram, em média, 15% em municípios com áreas cultivadas maiores que 2000 ha. O DP das estimativas de cana colhida em municípios com áreas cultivadas menores que 200 ha. foi de 33 ha. Em municípios com áreas cultivadas menores que 300 ha. não ultrapassou 17 ha. e em municípios com áreas cultivadas menores que 1000 ha. o DP não chegou a 10 ha.

Nota-se também a tendência de subestimativa nas estimativas, já que 88,2% dos municípios tiveram sua área de cana colhida subestimada. Em contrapartida, alguns municípios tiveram sua área de cana colhida superestimadas em até 100%. Rizzi (2004) chama a atenção para um efeito de compensação entre as áreas subestimadas e superestimadas, quando considerado um conjunto de municípios, tornando menos discrepantes as diferenças entre as estimativas e a referência em nível regional e estadual. A área estimada por meio da aplicação do limiar de 25% às imagens MODCSH, a área de referência, as diferenças absoluta, relativa e percentual de cada município são apresentadas no Apêndice B.

Estudos anteriores sugeriram que mapeamentos de áreas com imagens de sensores de resolução espacial moderada (p. ex., MODIS/Terra) tendem à subestimação (PAX-LENNEY e WOODCOCK, 1997), em decorrência do efeito de cisalhamento das bordas e da mistura entre as respostas espectrais de áreas menores que o tamanho dos *pixels* (PAX-LENNEY e WOODCOCK, 1997; LOBELL e ASNER, 2004; JIN e SADER, 2005).

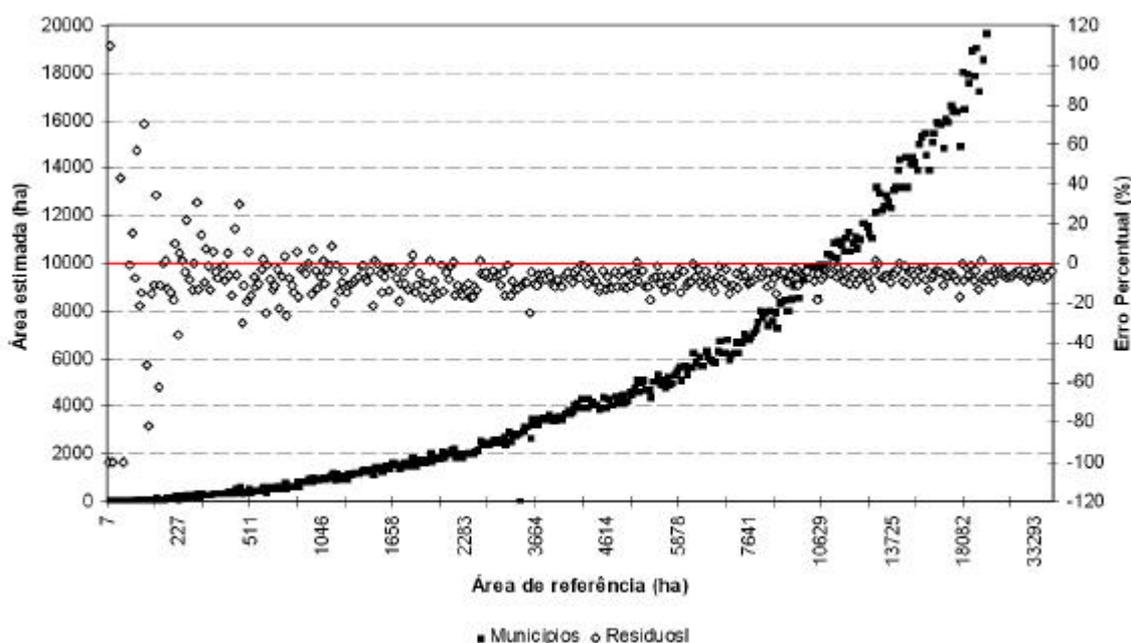


Figura 5.13 - Área estimada e erros de estimativa por tamanho de área de cana-de-açúcar cultivada por município.

As Tabelas 5.4 e 5.5 resumem os principais resultados quanto às estimativas de área colhida e permitem uma fácil comparação entre as técnicas de estimativa de área colhida. A aplicação do limiar de 23% de perda de biomassa sobre as composições MODCSH (Tabela 5.4) subestimou a área em apenas 0,74%, considerando 4% de cana bisada. As estimativas resultantes da aplicação do limiar de índice de vegetação nas composições MODC e MODCSH devem ser acompanhadas da ressalva quanto à seleção de talhões com baixos valores de NDVI, mesmo quando cobertos por cana em pé, verificada por meio da análise dos mapas finais.

No que tange as composições utilizadas, a maior diferença entre as estimativas de áreas colhidas foi encontrada para o limiar de 25% de perda de biomassa, em que a estimativa resultante do uso das composições MODCSH foi aproximadamente 7% maior em relação ao uso das composições MODC. A menor diferença foi encontrada para a estimativa resultante da aplicação do limiar de índice de vegetação, em que novamente o uso das composições MODCSH resultou em uma estimativa de área 2,93% maior.

Tabela 5.4 - Estimativas de área com o uso das imagens MODC e MODCSH.

Limiar	MODCSH			MODC		
	Área estimada (ha)	Diferença quanto à referência (%)	sem cana bisada (%)	Área estimada (ha)	Diferença quanto à referência (%)	sem cana bisada (%)
0,538	2.608.214	-2,87	1,13	2.806.404	-5,80	-1,80
25%	2.708.967	-6,24	-2,24	2.499.605	-13,50	-9,50
23%	2.751.609	-4,76	-0,76	2.589.869	-10,40	-6,40

A Tabela 5.5 apresenta os resultados dos testes F e t realizados para regressão entre as datas de referência e estimadas. Com exceção das estimativas resultantes da técnica de uso do limiar de índice de vegetação sobre as composições MODC e MDOCSH, todas as outras estimativas foram consideradas estatisticamente iguais aos dados de referência. Os valores p não foram significativos para  $\beta_0 = 0$  e para  $\beta_1 = 1$  (1% de nível de significância), conseqüentemente, a hipótese nula foi aceita em ambos os testes. Os valores p do teste de significância da regressão foram aceitos em todas as técnicas, a 1% de nível de significância, rejeitando a hipótese nula.

Tabela 5.5 – Valores - P resultantes dos testes t e F para regressão e parâmetros.

Técnicas		teste F		teste t	
		Regressão		$\beta_0 = 0$	$\beta_1 = 1$
Composições	Limiares	F	valor p	valor p	
MODCSH	23%	330,25	0,0	0,1880	0,1518
	25%	337,68	0,0	0,2222	0,1531
	0,538	121,08	0,0	0,0537	0,0101
MODC	23%	251,89	0,0	0,1386	0,1847
	25%	249,76	0,0	0,2872	0,2847
	0,538	97,94	0,0	0,0380	0,0040

A análise da Tabela 5.6 permite avaliar a precisão temporal das técnicas de estimativa de área. As técnicas que fizeram uso dos limiares de perda percentual de biomassa obtiveram os melhores resultados. Entre estas, as aplicadas sobre as composições MODCSH alcançaram 20 acertos, representando 48,8 e 50% dos *pixels* estimados com limiares de 23 e 25%, respectivamente.

O limiar de índice de vegetação, aplicado sobre as composições MODC, obteve a menor percentagem de acertos, 20,5%. Neste caso, o maior número de estimativas prévias confirmou a classificação de talhões cobertos por cana em pé e com baixos valores de NDVI, como colhidos. O limiar de 23% de perda de biomassa aplicado sobre as composições MODC resultou na *não estimação* da data de colheita de 4 *pixels* e em 21,1% de acertos. Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos pelos limiares de perda de biomassa, sejam eles: 0,95 e 0,94, para 25 e 23%, respectivamente.

Tabela 5.6 - Precisão temporal das técnicas de estimativa de área.

Limiar	Imagem	Estimativas			Total	<i>Pixels</i> não estimados	% acertos	R	R <sup>2</sup>
		Acertadas	Prévias	Tardias					
23	MODCSH	20	7	14	41	1	48,8	0,94	0,89
	MODC	8	9	21	38	4	21,1	0,93	0,87
25	MODCSH	20	7	13	40	2	50,0	0,95	0,90
	MODC	11	9	19	39	3	28,2	0,93	0,87
0,538	MODCSH	12	14	15	41	1	29,3	0,88	0,77
	MODC	8	16	15	39	3	20,5	0,85	0,73

As composições MODCSH possibilitaram, independentemente da técnica aplicada, a identificação de maior número de áreas de cana colhida durante a safra e os maiores

percentuais de acerto das datas de colheita. Este resultado aponta para o uso destas composições em um sistema operacional de monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. A metodologia desenvolvida para criação de tais composições é simples e está atrelada a disponibilidade das imagens diárias de reflectância e composições 16 dias de NDVI do sensor MODIS, bem como do mapa da área plantada da safra sob análise. A gratuidade de distribuição destas imagens e o uso de *softwares* com o mesmo status garantem o baixo custo da metodologia.

A título de exemplo, o mosaico final com a área colhida em cada intervalo de análise, resultante da aplicação do limiar de perda de biomassa de 23% sobre as imagens MODCSH e um recorte da área do município de Catanduva, são apresentados na Figura 5.14 e na Figura 5.15.

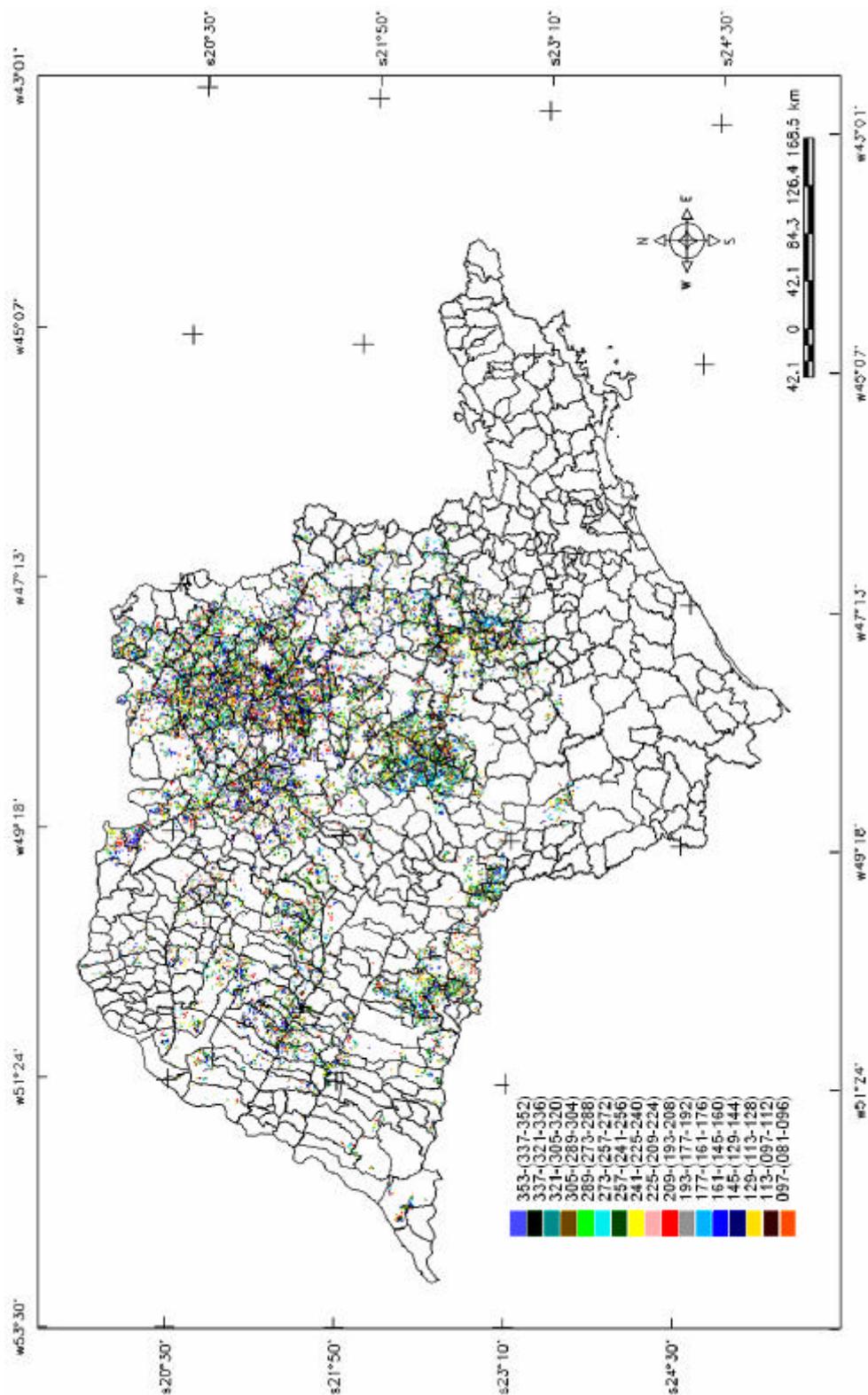


Figura 5.14 – Mosaico final da área de cana colhida por intervalo de análise, resultante da aplicação de limiar de 23% sobre imagens MODCSH.

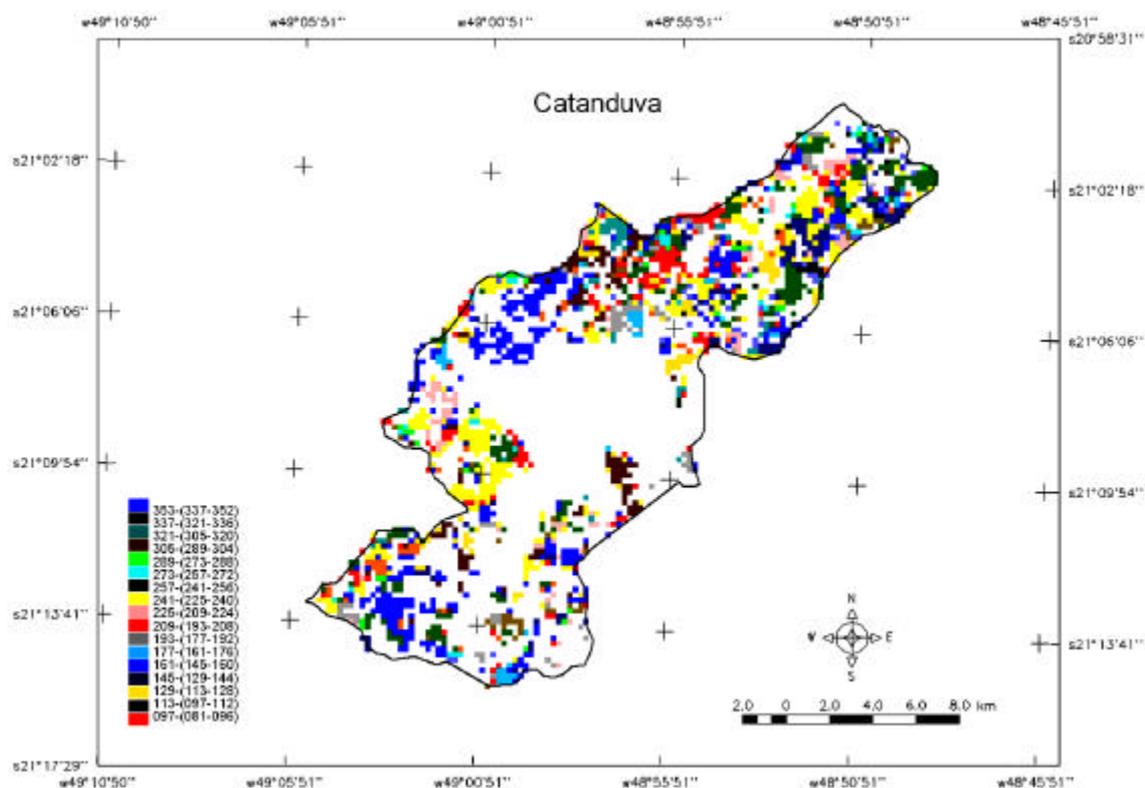


Figura 5.15 – Recorte do município de Catanduva com áreas de cana colhida por intervalo de análise.

### 5.5. Avaliação da discriminação do modo de colheita

Foram definidos três *endmembers* (Figura 5.16) com base na imagem MODIS/Terra (bandas 1, 2, 5 e 6) adquirida no dia 214 (01/08/2004), a saber: cana, palha e queima (para áreas colhidas com uso do fogo). Foi possível notar que não houve confusão entre os valores de reflectância dos diferentes alvos em nenhuma das bandas utilizadas, prerrogativa do MLME (TOMPKINS *et al.*, 1997; KESHAVA e MUSTARD, 2002; LOBELL e ASNER, 2004). A banda 5 (1230-1250 nm) proporcionou a maior distinção entre as respostas espectrais dos alvos, por outro lado, na banda 6 (1628-1652 nm) os *endmembers* queima e cana tiveram valor de reflectância semelhantes.

A escolha dos *endmembers* nas imagens MODIS/Terra mostrou-se eficiente e pôde ser avaliada por meio da imagem erro. Para validação do resultado obtido, dentre os 51 *pixels* puros pré-selecionados, foram identificados os *pixels* com data de colheita (de acordo com os dados da Usina Catanduva) anterior à data da imagem MODIS/Terra

utilizada. Dentre estes foram excluídos os que não continham informação sobre o modo de colheita e os que haviam sido colhidos com mais do que 110 dias antes da aquisição da imagem, restando um total de 10 *pixels*. São três modos de colheita possíveis: mecanizada com queima (MCQ), mecanizada crua (C) e manual com queima (MQ).

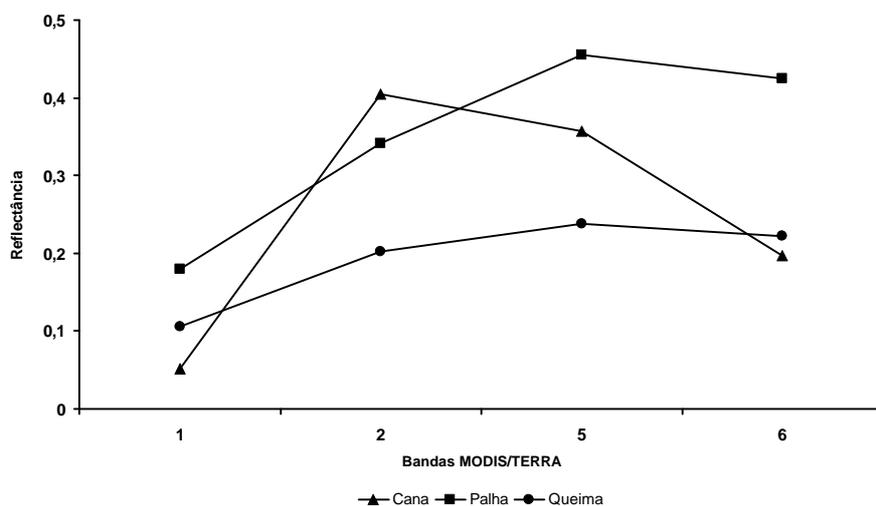


Figura 5.16 - *Endmembers* escolhidos com base na imagem MODIS/Terra adquirida no dia 214 (01/08/2004).

A Tabela 5.7 apresenta os *pixels* selecionados, a data e o modo de colheita de cada um deles, a diferença de dias entre a colheita e a aquisição da imagem MODIS/Terra e a proporção de cada *endmember* nas imagens fração (Figura 5.17). Apenas a área de um dos *pixels* (395770) foi colhida sem queima e apesar de tal área ter sido colhida 101 dias antes, a imagem fração palha apontou a presença de 47% (proporção majoritária) do *endmember* com o mesmo nome.

Condições do tempo e de manejo estão correlacionados à identificação das áreas colhidas e podem, p. ex. descaracterizar uma área queimada. As proporções dos *endmembers* são susceptíveis a tais influências, como também ao tempo entre a análise e o evento de colheita. Com exceção do *pixel* supracitado, em todos os outros *pixels* a proporção do *endmember* queima foi majoritária, corroborando os dados de referência (Figura 5.17). A variação destas proporções se deve a dinâmica local e ao tempo entre as datas de aquisição da imagem MODIS e da colheita.

Tabela 5.7 – Proporção de endmembers em *pixels* selecionados.

ID	Data Colheita	Diferença MODIS/Colheita	Modo	Fração			
				Cana	Palha	Queima	Erro
374360	192	22	MCQ	0,00	0,00	1,00	0,0035
374976	191	23	MCQ	0,00	0,04	0,96	0,0024
381935	211	3	MQ	0,00	0,31	0,69	0,0113
383997	159	55	MCQ	0,00	0,47	0,53	0,0119
388697	201	13	MQ	0,00	0,12	0,88	0,0004
392434	181	33	MQ	0,08	0,06	0,85	0,0056
393344	177	37	MQ	0,02	0,24	0,74	0,0035
394568	119	95	MQ	0,32	0,27	0,41	0,0029
395770	113	101	C	0,16	0,47	0,37	0,0105
396757	171	43	MQ	0,00	0,34	0,66	0,0052

A maior proporção do *endmember* cana foi encontrada no *pixel* 395668, onde já é possível notar a resposta espectral da vegetação. Tal *pixel* foi colhido 95 dias antes da data de aquisição da imagem MODIS/Terra, tempo suficiente para o crescimento da cana. O erro médio do modelo para estes *pixels* foi menor que 0,005 e indica a qualidade do modelo.

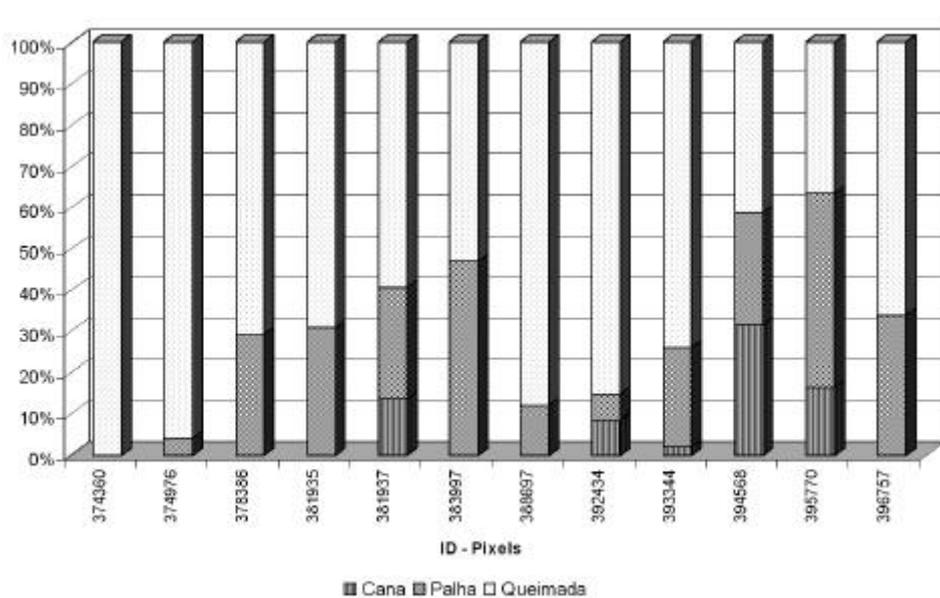


Figura 5.17 - Proporção das frações em cada pixel analisado.

As imagens fração são apresentadas nas Figuras 5.18g, 5.18h e 5.18i e em associação com a imagem TM adquirida no dia 218 (05/08/2004; Figura 5.18f), permitem uma comparação dos diferentes alvos. É possível notar os dois alvos de interesse nas figuras,

i. e, áreas onde a colheita da cana foi precedida de fogo e áreas onde a cana foi colhida crua. Estas áreas estão representadas em diferentes proporções nas imagens fração correspondentes.

A área em destaque na fração cana (Figura 5.18g) está coberta por cana em pé e tem grande proporção do *endmember* correspondente (altos valores de níveis de cinza). Na imagem fração palha (Figura 5.18h) a área em destaque corresponde a um talhão colhido mecanicamente sem queima e, na Figura 5.18i, a área em destaque corresponde a talhões de colheita precedida de fogo, todavia, limítrofe a uma área com resposta espectral diferente. É possível distinguir as duas áreas na imagem fração, levando em conta a diferença entre as resoluções espaciais.

A aplicação do modelo só tem validade nas áreas de cana, já que a estas áreas se referem os *endmembers* escolhidos, conseqüentemente as imagens fração foram recortadas com o mapa da cana plantada. Todavia, quando aplicado a todo o Estado, nota-se a semelhança de alguns alvos em relação aos *endmembers*, por exemplo, na imagem fração queima os maiores níveis de cinza estão associados às áreas cobertas por água (baixa reflectância) e na imagem fração palha as nuvens têm os maiores níveis de cinza (alta reflectância).

Em síntese, a comparação entre as imagens fração e as imagens do sensor TM corroborou a escolha dos *endmembers*. Os alvos de interesse foram discriminados, entretanto, a qualidade da discriminação está condicionada, entre outros fatores, ao tempo entre a colheita e a análise. Um sistema operacional para detecção de queimadas em áreas de cana deve contar com o máximo de imagens diárias livres de nuvens disponíveis com vistas a mitigar tal efeito.

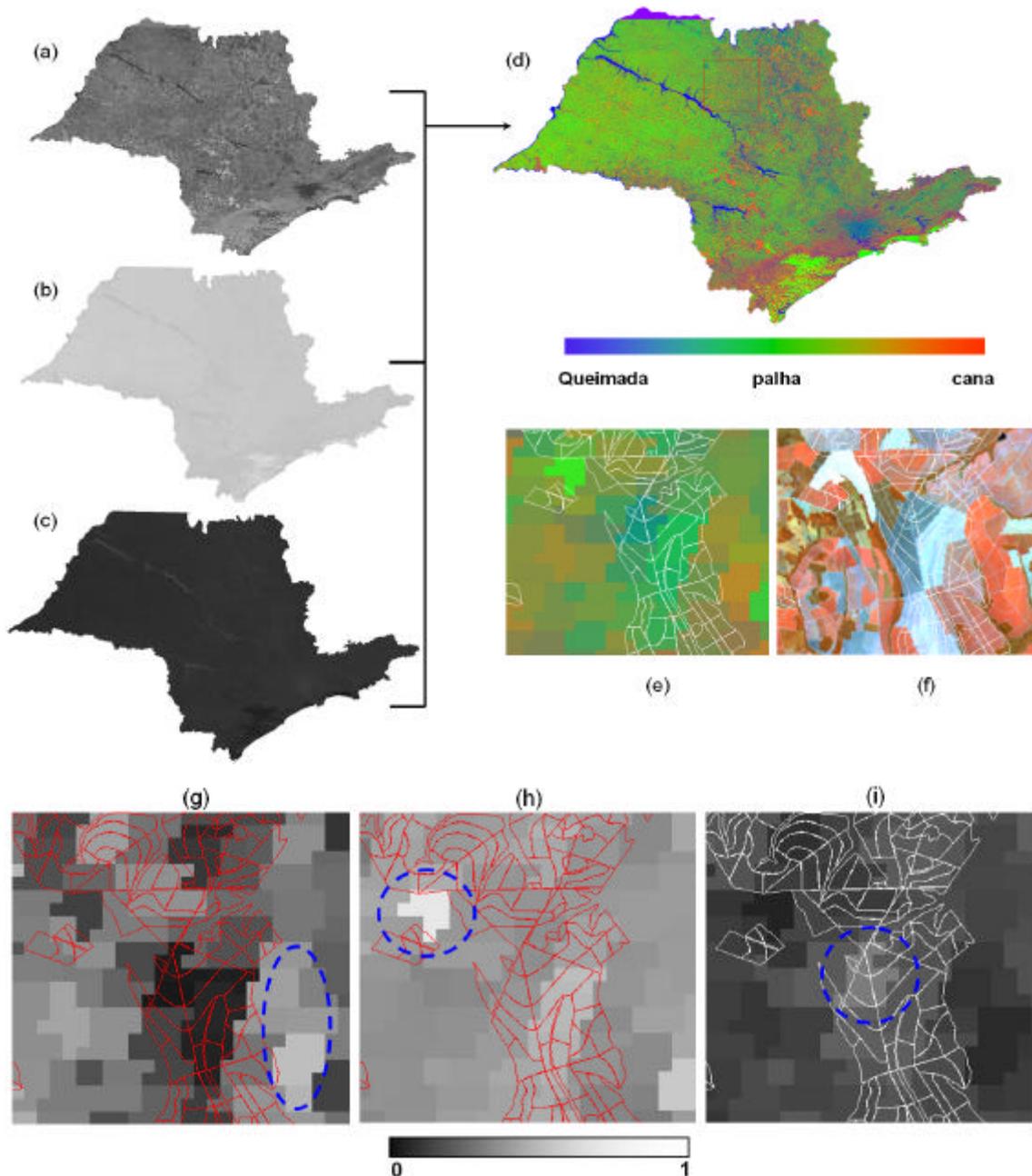


Figura 5.18 – Imagens fração componente cana (a); palha (b); queimada (c) resultante de MLME aplicado sobre imagem do sensor MODIS/Terra (bandas 1, 2, 5, e 6), adquirida no dia 214 (01/08/2004). Composição fração cana (vermelho), palha (verde) e queimada (azul) (d). Em detalhe, área de talhões de cana sob composição imagens fração (e); sob imagem TM/Landsat adquirida no dia 218 (05/08/2004; f) e imagens fração cana (g); palha (h) e queimada (i).



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos objetivos propostos e nos resultados alcançados, as principais conclusões do trabalho foram:

- Foi possível monitorar a colheita de cana-de-açúcar com imagens do sensor MODIS.
- A aplicação do limiar de perda de biomassa sobre as composições MODCSH resultou nas melhores estimativas da área de cana colhida. O limiar de 25% resultou na melhor estimativa das datas de colheita, enquanto o limiar de 23% obteve a melhor estimativa da área colhida.
- As composições MODCSH se mostraram apropriadas para detecção do corte da cana, pois evidenciaram as áreas colhidas ao longo da safra, além de aumentar a precisão das estimativas das datas de colheita.
- O uso do modelo linear de mistura espectral possibilitou discriminar as áreas colhidas sob os diferentes modos de colheita.

Em virtude da experiência adquirida, recomenda-se:

- Aplicar a metodologia de estimativa de área de cana-de-açúcar colhida indicada neste trabalho para outros anos safra, bem como avaliar a capacidade de identificação de áreas queimadas, de qualquer tipo, das composições MODCSH.
- Associar o produto QA MODIS (índice de qualidade dos *pixels*), como critério adicional, para seleção dos *pixels* no processo de composição da imagem MODCSH.
- Testar a capacidade de identificar os modos de colheita por meio do modelo linear de mistura espectral em áreas e intervalos de tempo maiores, com dados de campo para validação.

- Utilizar informações sobre focos de queimadas do produto MODIS *fire*, em associação com as imagens fração, para auxílio na identificação do modo de colheita.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; PAES, L. A. D. Monitoramento da Colheita da Cana. In: Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. (Org.). **O Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. 1 ed. São José dos Campos: Bookimage, 2006, v. 1, p. 373-378.
- AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; FEITOSA, F. F.; GONÇALVES, F. G.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R. Análise espacial da colheita da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: a influência da precipitação. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos, 2007, INPE.
- ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology: a comprehensive study of the saccharum source-to-sink system**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Scientific, 1973. 752 p.
- ALLEN, A. G., CARDOSO, A. A., ROCHA, G. O. Influence of sugar cane burning on aerosol soluble ion composition in Southeastern Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 38, n 30, p. 5025 – 5038. Sept. 2004.
- ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; CARVALHO JUNIOR, O. A. **MODIS: uma abordagem geral**. 2003. PI (INPE 10131-RPQ/752) CD ROM.
- ANDERSON, L.O.; SHIMABUKURO, Y.E.; ARAÍ, E. Multitemporal fraction images derived from Terra MODIS data for analyzing land cover change over the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 11, p. 2251-2257. June 2005.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. SPRING: Integrating remote sensing and GIS with object-oriented data modeling. **Computers and Graphics**, v.15, n.6, p. 13-22, 1996.
- Centro de Pesquisa Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura **CEPAGRI**. Campinas, 2006. Disponível em <<http://www.cepagri.unicamp.br/portal/index.php>> Acesso em: 15/01/2006.
- CHUVIECO, E.; VENTURA, G.; MARTÍN, M.P.; GÓMEZ, I. Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 94. p. 450-462. Feb. 2005.
- CROSS, A. M.; SETTLE, J. J.; DRAKE, N. A.; PAIVINEN, R. T. M. Subpixel measurement of tropical forest cover using AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 1119 – 1129. 1991.
- CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.
- DEAN, W. **A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. 483p.
- EDGERTON, C. W. **Sugarcane and its diseases**. Baton Rouge, L.A.: Louisiana State University, 1958. 301p.

- FREITAS, R. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; XAVIER, A. C.; NOVO, E.M.L.M. Análise da resposta espectral espacial e radiométrica dos dados MOD09 nos diferentes ângulos de visada. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII, 2005, Goiânia, Brasil **Anais...**São José dos Campos, INPE, 2005. p. 541-548.
- GALVÃO, L. S. ; FORMAGGIO, A. R. ; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 4, p. 523-534, May. 2005.
- GAO, X.; HUETE, A. R. Multisensor comparisons and validation of MODIS vegetation indices at the semiarid jornada experimental range. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 10. Oct. 2003.
- HAERTEL, F.; SHIMABUKURO, Y. E. Spectral linear mixing model in low spatial resolution imagem data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n 11. Nov. 2005.
- HUETE, A.R.; LIU, H.Q.; BATCHILY, K.; LEEUWEN, W.V. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 450-462. Mar. 1997.
- HUETE, A; JUSTICE. C.; LEEUWEN, W. V. **MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document**, 1999. Disponível em: <[modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod13.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf)> Acesso em: Jan. 2006.
- Instituto Geográfico Geológico (IGG) **Carta hipsométrica do Estado de São Paulo**. 1943. São Paulo (SP): Escala 1: 1.000.000.
- JIN, S.; SADER, S. A. MODIS time-series imagery for forest disturbance detection and quantification of patch size effects **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n 4, p. 462-470. Dec. 2005.
- JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. An overview of MODIS Land data processing product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n 1 – 2, p. 3 – 15. Nov. 2002.
- KESHAVA, N.; MUSTARD, J. F. Spectral unmixing. **IEEE Signal Processing Magazine**. v. 19, n. 1, p. 44-57. Jan. 2002.
- LARA, L.L.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A.; CAMARGO, P.B.; VICTORIA, R.L.; FERRAZ, E.S.B. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 4627-4637. Aug. 2005.
- LEEUWEN, W. J. D.; HUETE, A. R.; JIA, S.; WALTHALL, C. L. Comparison of vegetation index compositing scenarios BRDF versus maximum VI approaches. In: **IEEE-IGARSS**. Lincoln, Nebraska, p. 1423-1425. 1996.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 4. ed. Madison: University of Wisconsin, 1999, 750 p.
- LINGLE, S. E. Sugarcane. In: Smith, D. L.; Hamel, C. (eds.) **Crop Yield: physiology and processes**. Canadá: Mc Gill University, 1998. cap. 9, p 287 – 306.

- LIU, X.; KAFATOS, M. Land-cover mixing and spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n15, p. 3321-3327. Aug. 2005.
- LOBELL, D. B.; ASNER, G. P. Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n 3, p. 412 – 422. Nov. 2004.
- LUNETTA, R. S.; KNIGHT, J. F.; EDIRIWICKREMA, J.; LYON, J. G., WORTHY, L. D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, p. 142-154. Nov. 2006.
- LYON, J.G.; YUAN, D.; LUNETTA, R.S.; ELVIDGE, D. A change detection experiment using vegetation indices. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 64, n. 2, p. 143-150. 1998.
- MAS, J. F. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 1, p. 139-152. Jan. 1999.
- MATHER, P. M. Classification. In: \_\_\_\_\_. **Computer processing of remotely-sensed images**. West Sussex: John Wiley & Sons LTD. 1999. 292 p. cap. 8. p 167 – 209.
- MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 3, p?. May. 2000.
- National Aeronautics and Space Administration **MODIS IMAGES - NASA E.U.A.** 2006. Disponível em: < <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/surfrad.htm> e <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/vi.htm>> Acesso em: 16/02/2006.
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**. Instituto Agrônômico de Campinas (IAC). 1999. Campinas (SP): Escala 1:500.000
- PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, 431 p.
- PASTOR, C. Q. **Aplicación del modelo de mezclas espectrales en la teledetección forestal**. 2002. 222 p.. Tese (Doutorado em Física Aplicada) - Universidad de Valladolid, Valladolid. 2002.
- PAX-LENNEY, M.; WOODCOCK, C. E. Monitoring agricultural lands in Egypt with multitemporal Landsat TM imagery: how many images are needed? **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 522-529. Mar. 1997.
- PONÇANO, W. L. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Instituto Tecnológico de São Paulo (IPT). 1981 São Paulo (SP): Escala 1:1.000.000.
- PONTES, P. P. B.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XII, 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...São José dos Campos, INPE**, 2005. p. 217-224. 2005.

- PRICE, J. Comparing MODIS and TM + data for regional and global land classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 4, p. 491 – 494. Aug. 2003.
- QUARMBY, N. A.; TOWNSHEND, J. R. G.; SETTLE, J. J.; WHITE, K. H.; MILNES, M.; HINDLE, T. L.; SILLEOS, N. Linear Mixing modelling applied to AVHRR data for crop area estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 415 – 425. 1992.
- QUINTANO, C.; SHIMABUKURO, Y. E.; FERNANDEZ, A.; DELGADO, J. A. A spectral unmixing approach for mapping burned areas in Mediterranean countries. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n 7, p. 1493-1498. Apr. 2006.
- RIZZI, Rodrigo. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004-04-30. 214 p. (INPE-12271-TDI/983). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/jeferson/2004/07.02.14.17>>. Acesso em: 15 jun. 2007. rep: sid.inpe.br/jeferson/2004/07.02.14.17.
- RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa de área de soja no Estado do Rio Grande do Sul por um método de amostragem. **Ciência Rural**. v. 36, n 1, p. 30-35. 2006.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: ERTS symposium, 3., 1973, Washington, DC. NASA SP-351. Washington, DC: NASA 1973. v.1. p. 309-317.
- ROY, D. P.; BORAK, J. S.; DEVADIGA, S.; WOLFE, R. E.; ZHENG, M.; DESCLOITERS, J. The MODIS product quality assessment approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 62-76. Nov. 2002.
- RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. **Resposta espectral da cana-de-açúcar através de dados multitemporais do MSS do Landsat – 4**. São José dos Campos. INPE, 1985. 12 p. (INPE – 3474-PRE/717).
- RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n 3, p. 183-192. Sept. 1990.
- RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. 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. Dec. 1991.
- RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; XAVIER, A.C.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; ROSA, V. G. C.; SHIMABUKURO, Y.E. **Estimativa de área plantada com cana-de-açúcar em municípios do estado de São Paulo por meio de imagens de satélites e técnicas de geoprocessamento: ano safra 2003/2004**. São José dos Campos. INPE, 2004a. 47 p. (INPE-10791-RPQ/759).
- RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; ROSA, V. G. C. **Estimativa de área plantada com cana-de-açúcar em municípios do estado de**

**São Paulo por meio de imagens de satélites e técnicas de geoprocessamento: ano safra 2004/2005.** São José dos Campos. INPE, 2004b. 54 p. (INPE-11421-RPQ/762).

RUNNING, S. W.; JUSTICE, C. O.; SALOMONSON, V.; HALL, D.; BARKER, J.; KAUFMANN, Y. J.; STRAHLER, A. H.; HUETE, A. R.; MULLER, J. -P.; VANDERBILT, V.; WAN, Z. M.; TEILLET, P.; CARNEGGIE, D. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n 17, p. 3587-3620. 1994.

SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção.** 3 ed. São Paulo: Editora Hucitec, 1999. 308 p.

SANTOS, M.; SILVEIRA, M. L. **O Brasil: Território e Sociedade no início do século XXI.** 3 ed. Rio de Janeiro: Record, 2001. 471 p.

SEDANO, F.; GONG, P.; FERRÃO, M. Land cover assessment with MODIS imagery in southern African Miombo ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 4, p. 429 – 441. Oct. 2005.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16 – 20. Jan. 1991.

SHIMABUKURO, Y.E.; BATISTA, G.T.; MELLO, E.M.K.; MOREIRA, J.C.; DUARTE, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon Region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 3, p. 535-541. Feb. 1998.

SHIMABUKURO, Y. E., NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. especial, p. 1729-1737. 1998.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LANPARELLI, R. A. C. Análise do comportamento espectral de uma área comercial de cana-de-açúcar em duas safras por meio de radiometria de campo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003. Belo Horizonte, Brasil. **Anais...** São José dos Campos, INPE. 2003, p. 2367-2374.

TAN, B.; WOODCOCK, C. E.; HU, J.; ZANG, P.; OZDOGAN, M.; HUANG, D.; YANG, W.; KNYAZINKHIN, Y.; MYNENI, R.B. The impact of gridding artifacts on the local spatial properties of MODIS data: Implications for validation, compositing, and band-to-band registration across resolutions. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 2, p. 98-114. Nov. 2006.

União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA). Estatísticas agrícolas. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br>>. Acesso em: 17 de Nov. de 2006.

TOMPKINS, S.; MUSTARD, J. F.; PIETERS, C. M.; FORSYTH, D. W. Optimization of endmembers for spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 472-489. Mar. 1997.

XAVIER, A. C.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; BERKA, L. M. S. B.; MOREIRA, M. A. Multi-temporal analysis of MODIS data to classify sugarcane crop. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n 4, p. 755-768. Feb. 2006.

XIAO, X.; LIU, J.; ZHUANG, D.; FROLKING, S.; BOLES, S.; XU, B.; LIU, M.; SALAS, W.; MOORE III, B.; LI, C. Uncertainties in estimates of cropland area in China: a comparison between an AVHRR-derived dataset and Landsat TM-derived dataset. **Global and Planetary Change**. v. 37, p 297 – 306. Jun. 2003.

XIAO, X.; BOLES, S.; LIU, J.; ZHUANG, D.; FROLKING, S.; LI, C.; M.; SALAS, W.; MOORE III, B. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, n. 4, p. 480 – 492, Apr. 2005.

XIAO, X.; BOLES, S.; FROLKING, S.; LI, C.; BABU, J. Y.; SALAS, W.; MOORE III, B. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 1, p. 95 – 113, Jan. 2006.

ZHAN, X.; SOHLBERG, R. A.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIMICELI, C.; CARROL, M. L.; EASTMAN, J.C.; HANSEN, M. C.; DEFRIES, R. S. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n?, p. 336-350. Nov. 2002.





## APÊNDICE B

Tabela B1 – Área de cana-de-açúcar estimada e de referência dos municípios do Estado de São Paulo.

ID	MUNICIPIO	Referência (a) (ha)	Estimativa (b) (ha)	a - b (ha)	c/a (d)	d*100 (%)
626	URU	7	0	-7	-1,000	-100
125	CASSIA DOS COQUEIROS	15	31	16	1,099	110
406	ROSANA	17	0	-17	-1,000	-100
68	BAURU	18	69	51	2,848	285
175	ESTRELA DO NORTE	20	57	37	1,834	183
218	HORTOLÂNDIA	22	31	9	0,431	43
147	CRISTAIS PAULISTA	25	0	-25	-1,000	-100
217	HOLAMBRA	25	57	32	1,267	127
618	TURIUBA	25	88	63	2,526	253
609	TIMBURI	38	38	0	-0,006	-1
281	JALES	49	57	8	0,157	16
367	NOVA ALIANÇA	61	57	-4	-0,071	-7
58	BADY BASSITT	64	101	37	0,574	57
484	RIBEIRÃO DOS INDIOS	72	57	-15	-0,213	-21
359	MURUTINGA DO SUL	74	63	-11	-0,149	-15
234	ILHA SOLTEIRA	74	126	52	0,702	70
639	VITÓRIA BRASIL	78	38	-40	-0,516	-52
183	FLOREAL	103	19	-84	-0,817	-82
38	ARACOIABA DA SERRA	127	107	-20	-0,157	-16
619	TURMALINA	127	113	-14	-0,108	-11
205	GUARANI D'OESTE	131	176	45	0,346	35
422	PEREIRAS	132	50	-82	-0,618	-62
27	ANHUMAS	149	132	-17	-0,113	-11
489	RIFAINA	151	151	0	0,001	0
571	SARUTÁIA	180	183	3	0,014	1
430	PIQUEROBI	187	164	-23	-0,125	-12
642	ZACARIAS	191	164	-27	-0,143	-14
49	AURIFLAMA	215	176	-39	-0,180	-18
247	IRAPURU	223	246	23	0,101	10
25	ANGATUBA	225	145	-80	-0,356	-36
99	CACONDE	227	239	12	0,054	5
35	ARANDU	236	239	3	0,014	1
119	CAPELA DO ALTO	253	242	-11	-0,043	-4
98	BURITAMA	258	315	57	0,220	22
418	PEDRINHAS PAULISTA	260	239	-21	-0,080	-8
242	IPIGUA	269	233	-36	-0,134	-13
644	ESTIVA GERBI	275	275	0	0,000	0
137	CONCHAL	275	359	84	0,305	31
55	BALSAMO	291	252	-39	-0,134	-13
482	RIBEIRÃO CORRENTE	303	346	43	0,143	14
581	SOROCABA	307	277	-30	-0,098	-10
535	SANTO ANTONIO DA ALEGRIA	312	334	22	0,070	7
29	APARECIDA D'OESTE	327	321	-6	-0,018	-2

Continua...

Tabela B1 (Continuação)

192 GASTAO VIDIGAL	333	290	-43	-0,130	-13
292 JUMIRIM	350	372	22	0,061	6
475 REGENTE FEIJÓ	363	346	-17	-0,046	-5
617 TUPI PAULISTA	373	346	-27	-0,072	-7
376 NOVA LUZITANIA	374	365	-9	-0,023	-2
471 QUINTANA	378	372	-6	-0,017	-2
138 CONCHAS	413	378	-35	-0,085	-9
112 CAMPOS NOVOS PAULISTA	431	453	22	0,052	5
240 IPERÓ	441	416	-25	-0,058	-6
555 SÃO JOSÉ DO RIO PARDO	442	372	-70	-0,159	-16
66 BASTOS	450	529	79	0,175	18
2 ADOLFO	462	434	-28	-0,060	-6
381 OLEO	466	604	138	0,297	30
278 JACI	485	340	-145	-0,299	-30
462 PRESIDENTE BERNARDES	487	434	-53	-0,108	-11
415 PEDRANÓPOLIS	488	397	-91	-0,187	-19
469 QUEIROZ	506	535	29	0,058	6
103 CAIUA	511	428	-83	-0,162	-16
575 SERRA NEGRA	524	491	-33	-0,063	-6
467 PRACINHA	534	472	-62	-0,116	-12
449 PONTALINDA	548	491	-57	-0,104	-10
463 RIBEIRÃO DO SUL	583	567	-16	-0,028	-3
215 GUZOLANDIA	603	617	14	0,023	2
556 SÃO JOSÉ DO RIO PRETO	604	453	-151	-0,249	-25
332 MERIDIANO	630	623	-7	-0,011	-1
599 TAQUARITUBA	637	586	-51	-0,081	-8
148 CRUZALIA	658	573	-85	-0,129	-13
341 MIRASSOLANDIA	677	604	-73	-0,107	-11
321 MANDURI	682	661	-21	-0,031	-3
540 SANTO EXPEDITO	690	535	-155	-0,224	-22
340 MIRASSOL	696	649	-47	-0,068	-7
361 NARANDIBA	742	768	26	0,035	4
316 MACAUBAL	751	554	-197	-0,262	-26
451 POPULINA	755	699	-56	-0,074	-7
263 ITAPURA	787	699	-88	-0,112	-11
641 VOTUPORANGA	802	686	-116	-0,144	-14
434 PIRAJU	808	856	48	0,060	6
144 COSMÓRAMA	838	699	-139	-0,166	-17
467 QUADRA	847	825	-22	-0,026	-3
594 TANABI	861	825	-36	-0,042	-4
271 ITÓBI	923	875	-48	-0,052	-5
331 MENDONÇA	948	951	3	0,003	0
392 OURO VERDE	986	831	-155	-0,157	-16
82 BORA	991	1064	73	0,074	7
160 DRACENA	1011	976	-35	-0,035	-3
40 AREALVA	1013	888	-125	-0,124	-12
597 TAQUARAL	1020	951	-69	-0,068	-7
256 ITAPEVA	1046	1058	12	0,011	1
507 SALTO	1059	951	-108	-0,102	-10
220 IACRÍ	1095	1058	-37	-0,034	-3
22 AMPARO	1120	1108	-12	-0,011	-1
171 ENGENHEIRO COELHO	1127	1228	101	0,090	9
176 EUCLIDES DA CUNHA PAULISTA	1135	913	-222	-0,196	-20
74 BIRIGUI	1138	1133	-5	-0,004	0
272 ITU	1146	989	-157	-0,137	-14
109 CAMPINAS	1148	1039	-109	-0,095	-9

Continua...

Tabela B1 (Continuação)

516 SANTA CRUZ DA CONCEICAO	1166	1127	-39	-0,033	-3
370 NOVA CASTILHO	1177	1001	-176	-0,149	-15
318 MAGDA	1276	1140	-136	-0,107	-11
73 BILAC	1311	1178	-133	-0,102	-10
391 OUR OESTE	1316	1190	-126	-0,096	-10
495 RIOLANDIA	1324	1222	-102	-0,077	-8
130 CERQUEIRA CESAR	1325	1240	-85	-0,064	-6
238 INUBIA PAULISTA	1326	1303	-23	-0,017	-2
402 PARANAPANEMA	1343	1335	-8	-0,006	-1
491 RINOPOLIS	1391	1285	-106	-0,077	-8
23 ANALANDIA	1394	1272	-122	-0,088	-9
377 NOVA ODESSA	1418	1366	-52	-0,036	-4
129 CEDRAL	1448	1140	-308	-0,213	-21
140 COROADOS	1457	1480	23	0,016	2
533 SANTO ANASTACIO	1458	1461	3	0,002	0
44 ARTUR NOGUEIRA	1494	1417	-77	-0,052	-5
50 AVAI	1509	1285	-224	-0,149	-15
116 CANDIDO RODRIGUES	1544	1442	-102	-0,066	-7
476 REGINOPOLIS	1552	1524	-38	-0,024	-2
126 CASTILHO	1637	1410	-227	-0,138	-14
421 PEREIRA BARRETO	1657	1625	-32	-0,020	-2
136 COLOMBIA	1658	1618	-40	-0,024	-2
461 PRESIDENTE ALVES	1679	1562	-117	-0,070	-7
172 ESPIRITO SANTO DO PINHAL	1700	1373	-327	-0,193	-19
203 GUARACAI	1707	1536	-171	-0,100	-10
39 ARCO-IRIS	1738	1656	-82	-0,047	-5
501 SAGRES	1760	1574	-186	-0,106	-11
189 GABRIEL MONTEIRO	1777	1543	-234	-0,132	-13
312 LUIZIANIA	1777	1763	-14	-0,008	-1
500 SABINO	1784	1864	80	0,045	4
466 POTIRENDABA	1807	1549	-258	-0,143	-14
167 EMBAUBA	1861	1656	-205	-0,110	-11
509 SALTO GRANDE	1861	1763	-98	-0,053	-5
307 LOURDES	1950	1763	-187	-0,096	-10
389 OSVALDO CRUZ	1985	1650	-335	-0,169	-17
19 AMERICANA	2007	1795	-212	-0,106	-11
280 JAGUARIUNA	2038	2072	34	0,017	2
131 CERQUILHO	2099	1732	-367	-0,175	-18
290 JOSE BONIFACIO	2111	1921	-190	-0,090	-9
445 POLONI	2118	1826	-292	-0,138	-14
536 SANTO ANTONIO DE POSSE	2157	1820	-337	-0,156	-16
173 ESPIRITO SANTO DO TURVO	2171	2160	-11	-0,005	-1
624 UNIAO PAULISTA	2174	1876	-298	-0,137	-14
564 SAO PEDRO DO TURVO	2187	2084	-103	-0,047	-5
142 CORUMBATAI	2206	2028	-178	-0,081	-8
583 SUMARE	2224	2198	-26	-0,012	-1
235 INDAIATUBA	2228	2248	20	0,009	1
416 PEDREGULHO	2250	1883	-367	-0,163	-16
170 EMILIANOPOLIS	2257	2015	-242	-0,107	-11
572 SEBASTIANOPOUS DO SUL	2263	1927	-336	-0,149	-15
182 FLORA RICA	2267	1895	-372	-0,164	-16
365 NHANDEARA	2283	2009	-274	-0,120	-12
410 PAULINIA	2325	2084	-241	-0,104	-10
174 ESTRELA D'OESTE	2392	1996	-396	-0,166	-17
502 SALES	2405	2002	-403	-0,167	-17
596 TAPIRATIBA	2424	2135	-289	-0,119	-12

Continua...

Tabela B1 (Continuação)

210 GUAREI	2526	2191	-335	-0,133	-13
287 JERIQUEIRA	2540	2582	42	0,016	2
438 PIRAPÓZINHO	2551	2412	-139	-0,055	-5
465 PRESIDENTE VENCESLAU	2628	2475	-153	-0,058	-6
372 NOVA GRANADA	2632	2519	-113	-0,043	-4
505 SALMOURAO	2644	2456	-188	-0,071	-7
393 PACAEMBU	2654	2481	-173	-0,065	-7
364 NEVES PAULISTA	2704	2613	-91	-0,034	-3
591 TAIACU	2712	2525	-187	-0,069	-7
322 MARABÁ PAULISTA	2747	2594	-153	-0,056	-6
314 LUTECIA	2831	2525	-306	-0,108	-11
394 PALESTINA	2838	2714	-124	-0,044	-4
578 SEVERINIA	2879	2418	-461	-0,160	-16
255 ITAPETININGA	2953	2934	-19	-0,006	-1
366 NIPOÁ	3054	2563	-491	-0,161	-16
620 UBARANA	3134	2859	-275	-0,088	-9
134 CLEMENTINA	3251	2815	-436	-0,134	-13
506 SALTINHO	3294	2884	-410	-0,124	-12
117 CANITAR	3339	0	-3339	-1,000	-100
289 JOÃO RAMALHO	3355	2991	-364	-0,109	-11
517 SANTA CRUZ DA ESPERANÇA	3517	3174	-343	-0,098	-10
424 PIACATU	3544	3199	-345	-0,097	-10
79 BOITUVA	3566	2689	-877	-0,246	-25
88 BARBOSA	3623	3476	-147	-0,041	-4
132 CESÁRIO LANGE	3632	3249	-383	-0,105	-11
612 TRABIJU	3664	3262	-402	-0,110	-11
541 SANTOPOLIS DO AGUAPEI	3683	3457	-226	-0,061	-6
585 SUZANAPOLIS	3745	3451	-294	-0,079	-8
246 IRAPUÁ	3747	3520	-227	-0,061	-6
638 VISTA ALEGRE DO ALTO	3760	3470	-290	-0,077	-8
352 MONTE AZUL PAULISTA	3810	3633	-177	-0,046	-5
196 GLICERIO	3830	3564	-266	-0,069	-7
26 ANHEMBI	3862	3438	-424	-0,110	-11
251 ITAJU	3879	3425	-454	-0,117	-12
163 ECHAPORA	3889	3583	-306	-0,079	-8
324 MARAFOAMA	3910	3495	-415	-0,106	-11
442 PLANALTO	3937	3488	-449	-0,114	-11
85 BOREBI	3971	3747	-224	-0,057	-6
632 VARGEM GRANDE DO SUL	4022	3854	-168	-0,042	-4
166 ELISIÁRIO	4087	3747	-340	-0,083	-8
197 GUAICARA	4186	3784	-402	-0,096	-10
219 IACANGA	4252	4080	-172	-0,040	-4
355 MONTE MOR	4259	4131	-128	-0,030	-3
159 DOURADO	4314	3986	-328	-0,076	-8
460 PRATÂNIA	4364	4338	-26	-0,006	-1
186 FRANCA	4394	4345	-49	-0,011	-1
498 RUBIACEA	4400	3961	-439	-0,100	-10
408 PATROCÍNIO PAULISTA	4421	4307	-114	-0,026	-3
269 ITIRAPINA	4423	4200	-223	-0,050	-5
587 TABATINGA	4483	4106	-377	-0,084	-8
195 GETULINA	4497	4099	-398	-0,088	-9
223 IBIRÁ	4500	3885	-615	-0,137	-14
294 JUNQUEIROPOLIS	4504	3986	-518	-0,115	-12
179 FERNANDO PRESTES	4558	4395	-163	-0,036	-4
241 IPEUNA	4566	3980	-586	-0,128	-13
360 NANTES	4614	4301	-313	-0,068	-7

Continua...

Tabela B1 (Continuação)

106 CAJOBI	4623	4093	-530	-0,115	-11
371 NOVA EUROPA	4635	4068	-567	-0,122	-12
443 PLATINA	4672	4477	-195	-0,042	-4
550 SAO JOAO DE IRACEMA	4692	4137	-555	-0,118	-12
589 TACIBA	4698	4439	-259	-0,055	-6
71 BERNARDINO DE CAMPOS	4702	4540	-162	-0,034	-3
88 BRAUNA	4732	4168	-564	-0,119	-12
193 GAVIAO PEIXOTO	4878	4282	-596	-0,122	-12
100 CAFELANDIA	4942	4641	-301	-0,061	-6
101 CAIABU	5058	4502	-556	-0,110	-11
548 SAO JOAO DA BOA VISTA	5068	4836	-232	-0,046	-5
525 SANTA MARIA DA SERRA	5090	5132	42	0,008	1
8 AGUDOS	5126	4660	-466	-0,091	-9
395 PALMARES PAULISTA	5200	5012	-188	-0,036	-4
143 COSMOPOLIS	5286	5100	-186	-0,035	-4
13 ALTO ALEGRE	5317	4679	-638	-0,120	-12
298 LARANJAL PAULISTA	5326	4710	-616	-0,116	-12
194 GENERAL SALGADO	5361	4383	-978	-0,183	-18
258 ITAPIRA	5441	5050	-391	-0,072	-7
522 SANTA GERTRUDES	5455	5088	-367	-0,067	-7
52 AVARE	5463	5390	-73	-0,013	-1
401 PARAISO	5487	4918	-569	-0,104	-10
603 TATUI	5498	5144	-354	-0,064	-6
464 PORTO FERREIRA	5585	4823	-762	-0,136	-14
435 PIRAJUI	5600	5270	-330	-0,059	-6
345 MOJI-MIRIM	5621	4962	-659	-0,117	-12
338 MIRANDOPOLIS	5677	5025	-652	-0,115	-11
185 FLORINIA	5696	5340	-356	-0,063	-6
375 NOVAIS	5817	5497	-320	-0,055	-5
42 AREIOPOLIS	5878	5692	-186	-0,032	-3
344 MOGII-GUACU	5971	5107	-864	-0,145	-14
224 IBIRAREMA	5977	5749	-228	-0,038	-4
178 FERNANDOPOLIS	6047	5371	-676	-0,112	-11
623 UCHOA	6250	5655	-595	-0,095	-10
592 TAUVA	6263	5661	-602	-0,096	-10
88 BORACEIA	6268	6259	-9	-0,001	0
404 PARAPUA	6274	5869	-405	-0,065	-6
20 AMERICO BRASILENSE	6296	6089	-207	-0,033	-3
531 SANTA ROSA DE VITERBO	6350	5749	-601	-0,095	-9
563 SAO PEDRO	6478	5730	-748	-0,115	-12
139 CORDEIROPOLIS	6542	6316	-226	-0,035	-3
229 IGARACU DO TIETE	6547	6076	-471	-0,072	-7
436 PIRANGI	6571	5982	-589	-0,090	-9
309 LUCELIA	6695	5938	-757	-0,113	-11
464 PRESIDENTE PRUDENTE	6764	5843	-921	-0,136	-14
328 MARTINOPOLIS	6825	6360	-465	-0,068	-7
245 IRACEMAPOLIS	6872	6794	-78	-0,011	-1
611 TORRINHA	6874	6309	-565	-0,082	-8
299 LAVINIA	6949	6309	-640	-0,092	-9
94 BURITIZAL	7012	6813	-199	-0,028	-3
3 AGUAI	7015	5957	-1058	-0,151	-15
350 MONTE ALTO	7056	6221	-835	-0,118	-12
574 SERRANA	7065	6297	-768	-0,109	-11
165 ELIAS FAUSTO	7081	6712	-369	-0,052	-5
133 CHARQUEADA	7163	6259	-904	-0,126	-13
472 RAFARD	7209	6719	-490	-0,068	-7

Continua...

Tabela B1 (Continuação)

228 IEPE	7241	7046	-195	-0,027	-3
11 ALTAIR	7317	6889	-428	-0,059	-6
346 MOMBUCA	7639	6845	-794	-0,104	-10
383 ONDA VERDE	7641	6926	-715	-0,094	-9
124 CASA BRANCA	7827	7134	-693	-0,089	-9
225 IBITINGA	7855	7254	-601	-0,077	-8
582 SUD MENUCCI	7967	7588	-379	-0,048	-5
478 RESTINGA	8211	8035	-176	-0,021	-2
162 DUMONT	8324	7764	-560	-0,067	-7
48 ARIRANHA	8369	7978	-391	-0,047	-5
473 RANCHARIA	8431	7455	-976	-0,116	-12
1 ADAMANTINA	8434	8035	-399	-0,047	-5
627 URUPES	8527	7644	-883	-0,104	-10
428 PINDORAMA	8594	7972	-622	-0,072	-7
492 RIO CLARO	8601	7304	-1297	-0,151	-15
524 SANTA LUCIA	8686	8381	-305	-0,035	-4
60 BARRA BONITA	8843	8419	-424	-0,048	-5
262 ITAPUI	8852	8457	-395	-0,045	-4
200 GUAPIACU	8890	8079	-811	-0,091	-9
351 MONTE APRAZMEL	8897	8066	-831	-0,093	-9
88 BOTUCATU	9052	8545	-507	-0,056	-6
128 CATIGUA	9382	9074	-308	-0,033	-3
47 ASSIS	9433	9193	-240	-0,025	-3
608 TIETE	9617	8570	-1047	-0,109	-11
64 BARRINHA	9619	9181	-438	-0,046	-5
458 PRADOPOLIS	9811	9307	-504	-0,051	-5
643 CHAVANTES	10069	9615	-454	-0,045	-5
520 SANTA ERNESTINA	10217	9836	-381	-0,037	-4
390 DURINHOS	10316	9596	-720	-0,070	-7
239 IPAUCU	10394	9848	-546	-0,053	-5
593 TAMBAU	10396	9508	-888	-0,085	-9
480 RIBEIRAO BONITO	10463	8570	-1893	-0,181	-18
227 ICEM	10571	9993	-578	-0,055	-5
222 IBATE	10629	9798	-831	-0,078	-8
90 BRODOSQUI	10667	10012	-655	-0,061	-6
553 SAO JOSE DA BELA VISTA	10852	10434	-418	-0,039	-4
204 GUARACI	10872	10428	-444	-0,041	-4
335 MINEIROS DO TIETE	10916	10383	-533	-0,049	-5
84 BORBOREMA	10928	10906	-22	-0,002	0
305 LINS	10975	10213	-762	-0,069	-7
156 DOBRADA	11253	10975	-278	-0,025	-2
397 PALMITAL	11358	10780	-578	-0,051	-5
530 SANTA RITA DO PASSA QUATRO	11534	10541	-993	-0,086	-9
385 ORINDIUA	11545	11076	-469	-0,041	-4
70 BENTO DE ABREU	11726	11341	-385	-0,033	-3
107 CAJURU	11747	10560	-1187	-0,101	-10
303 LIMEIRA	11787	10900	-887	-0,075	-8
573 SERRA AZUL	11812	11164	-648	-0,055	-5
77 BOCAINA	11893	10673	-1220	-0,103	-10
329 MATAO	11986	11007	-979	-0,082	-8
249 ITAI	12192	11699	-493	-0,040	-4
24 ANDRADINA	12377	11681	-696	-0,056	-6
586 TABAPUA	12405	11574	-831	-0,067	-7
34 ARAMINA	12502	11271	-1231	-0,098	-10
518 SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS	12622	11076	-1546	-0,122	-12
127 CATANDUVA	12662	12222	-440	-0,035	-3

Continua...

Tabela B1 (Continuação)

115 CANDIDO MOTA	12995	13204	209	0,016	2
606 TEODORO SAMPAIO	13005	12971	-34	-0,003	0
342 MOCOCA	13185	12247	-938	-0,071	-7
493 RIO DAS PEDRAS	13271	12442	-829	-0,062	-6
637 VIRADOURO	13671	12896	-775	-0,057	-6
466 PROMISSAO	13709	12594	-1115	-0,081	-8
301 LEME	13715	12386	-1329	-0,097	-10
607 TERRA ROXA	13725	13135	-590	-0,043	-4
358 MOTUCA	13918	13223	-695	-0,050	-5
51 AVANHANDAVA	14349	13941	-408	-0,028	-3
12 ALTINOPOLIS	14410	14382	-28	-0,002	0
184 FLORIDA PAULISTA	14549	13261	-1288	-0,089	-9
275 JABORANDI	14713	14539	-174	-0,012	-1
323 MARACAI	14717	13248	-1469	-0,100	-10
513 SANTA BARBARA D'OESTE	14846	14237	-609	-0,041	-4
568 SAO SIMAO	15075	14495	-580	-0,038	-4
69 BARIRI	15128	14269	-859	-0,057	-6
511 SANTA ADELIA	15263	13941	-1322	-0,087	-9
490 RINCAO	15586	15043	-543	-0,035	-3
315 MACATUBA	15697	15352	-345	-0,022	-2
386 ORLANDIA	15783	15484	-299	-0,019	-2
91 BROTAS	15830	14590	-1240	-0,078	-8
439 PIRASSUNUNGA	16149	13973	-2176	-0,135	-13
453 PORTO FELIZ	16292	15100	-1192	-0,073	-7
250 ITAJOBI	16453	15484	-969	-0,059	-6
230 IGARAPAVA	16531	15956	-575	-0,035	-3
519 SANTA CRUZ DO RIO PARDO	16559	15899	-660	-0,040	-4
135 COLINA	16612	15881	-731	-0,044	-4
152 DESCALVADO	16758	14860	-1898	-0,113	-11
379 NUPORANGA	17033	16095	-938	-0,055	-6
412 PAULO DE FARIA	17087	15988	-1099	-0,064	-6
146 CRAMINHOS	17457	16655	-802	-0,046	-5
503 SALES OLIVEIRA	17462	16491	-971	-0,056	-6
202 GUARA	17608	16397	-1211	-0,069	-7
334 MIGUELOPOLIS	17948	16416	-1532	-0,085	-9
120 CAPIVARI	18026	14968	-3058	-0,170	-17
260 ITAPOLIS	18065	18028	-37	-0,002	0
602 TARUMA	18082	16498	-1584	-0,088	-9
32 ARACATUBA	18425	18009	-416	-0,023	-2
274 ITUVERAVA	18724	17637	-1087	-0,058	-6
214 GUATAPARA	19180	18972	-208	-0,011	-1
537 SANTO ANTONIO DO ARACANGUA	19694	17952	-1742	-0,088	-9
244 IPUA	19840	19092	-748	-0,038	-4
76 BOA ESPERANCA DO SUL	19853	17260	-2593	-0,131	-13
211 GUARIBA	20082	20307	225	0,011	1
488 QUATA	20243	18613	-1630	-0,081	-8
420 PENAPOLIS	21512	19696	-1816	-0,084	-8
69 BEBEDOURO	21565	20339	-1226	-0,057	-6
598 TAQUARITINGA	21994	20609	-1385	-0,063	-6
382 OLIMPIA	22402	20269	-2133	-0,095	-10
311 LUIS ANTONIO	22649	21913	-736	-0,033	-3
546 SAO CARLOS	22919	21686	-1233	-0,054	-5
207 GUARARAPES	23538	22876	-662	-0,028	-3
552 SAO JOAQUIM DA BARRA	23758	22473	-1285	-0,054	-5
448 PONTAL	23765	22436	-1329	-0,056	-6
576 SERTAOZINHO	25309	23412	-1897	-0,075	-7

Continua...

Tabela B1 (Conclusão).

378 NOVO HORIZONTE	25496	23827	-1669	-0,065	-7
38 ARARAS	25866	24129	-1737	-0,067	-7
487 RIBEIRAO PRETO	26517	25231	-1286	-0,048	-5
630 VALPARAISO	26820	25716	-1104	-0,041	-4
441 PITANGUEIRAS	27348	26314	-1034	-0,038	-4
63 BARRETOS	27367	25722	-1645	-0,060	-6
284 JARDINOPOLIS	27557	26088	-1469	-0,053	-5
560 SAO MANUEL	28171	26925	-1246	-0,044	-4
157 DOIS CORREGOS	29807	27133	-2674	-0,090	-9
413 PEDERNEIRAS	30732	29626	-1106	-0,036	-4
199 GUAIRA	32418	30615	-1803	-0,056	-6
67 BATATAIS	33293	32492	-801	-0,024	-2
37 ARARAQUARA	34734	32340	-2394	-0,069	-7
302 LENCOIS PAULISTA	37736	35841	-1895	-0,050	-5
286 JAU	39407	36742	-2665	-0,068	-7
433 PIRACICABA	39780	36641	-3139	-0,079	-8
399 PARAGUACU PAULISTA	41730	38927	-2803	-0,067	-7
276 JABOTICABAL	46236	44424	-1812	-0,039	-4
356 MORRO AGUDO	90165	87148	-3017	-0,033	-3
<b>Total</b>	<b>2889181</b>	<b>2708967</b>		<b>Média</b>	<b>-6,24</b>

## ANEXO A

Anexo 1A – Calendário juliano.

(1988, 1992, 1996, 2000, 2004, 2008, 2012, ...)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	1	32	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
2	2	33	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
3	3	34	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
4	4	35	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
5	5	36	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
6	6	37	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
7	7	38	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
8	8	39	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
9	9	40	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
10	10	41	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
11	11	42	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
12	12	43	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
13	13	44	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
14	14	45	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
15	15	46	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
16	16	47	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
17	17	48	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
18	18	49	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
19	19	50	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
20	20	51	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
21	21	52	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
22	22	53	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
23	23	54	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
24	24	55	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
25	25	56	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
26	26	57	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
27	27	58	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
28	28	59	88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
29	29	60	89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
30	30		90	121	151	182	212	243	274	304	335	365
31	31		91		152		213	244		305		366



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.