

SENSORIAMENTO REMOTO MULTISSENSORES PARA A AVALIAÇÃO TEMPORAL DA EXPANSÃO AGRÍCOLA MUNICIPAL (1)

SILVIA CRISTINA DE JESUS (2); JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO (2*)

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar a evolução temporal (33 anos) da expansão agrícola usando a técnica de Análise por Componentes Principais (ACP) para a geração de componentes de brilho e verdor, aplicada a dados de múltiplos sensores com distintas características espectrais e de resolução espacial. A partir dessas componentes, a Análise por Vetores de Mudanças (AVM) pode, então, fornecer informações sobre a intensidade e o tipo de mudança ocorrida. Utilizaram-se imagens orbitais MSS/Landsat, TM/Landsat e CCD/CBERS adquiridas entre 1975 e 2008. O coeficiente Kappa variou de 0,18 a 0,41, indicando que a Análise por Vetores de Mudanças exibe concordância fraca ou regular em relação à interpretação visual. Considerando um nível de significância de $p=0,05$, verificou-se que o resultado da AVM é superior à classificação aleatória. De modo geral, os erros devem-se a confusões espectrais associadas à cobertura do solo natural ou antrópica, tal como campo sujo e pasto, além de incrementos na biomassa vegetal, que podem se referir à regeneração florestal ou desenvolvimento de culturas agrícolas. A AVM foi útil na detecção de mudanças a fim de permitir o uso de múltiplos parâmetros e a análise de suas variações ao longo do tempo. Como dados de entrada, as Componentes Principais mostraram meios diretos e rápidos para a geração de informações de brilho e verdor de uma determinada cena. As componentes principais foram viáveis na análise da variação desses parâmetros.

Palavras-chave: imagens de satélites, detecção de mudanças, análise por componentes principais, análise por vetores de mudanças, agricultura.

ABSTRACT

REMOTE SENSING FOR MULTITEMPORAL ANALYSIS OF AGRICULTURAL EXPANSION

The main objective was to study the multitemporal expansion of agriculture for 33 years using three different satellites/sensors, by applying Principal Components Analysis techniques in order to generate the components of brightness and greenness for each dataset. The use of these components for the Change Vector Analysis can thus provide information on the intensity and type of change occurred. We used MSS/Landsat, TM/Landsat and CCD/CBERS, acquired between 1975 and 2008. The Kappa coefficients ranged from 0.18 to 0.41, indicating that the change of Vector Analysis had slight or fair agreement with visual analysis. Assuming a significance level of 0.05, it was verified that the result of analysis by Change Vector Analysis is better than a random classification. In general, the errors are due to spectral confusion associated with natural or anthropogenic land use, such as "natural grassland" and grazing, and increases in plant biomass, which may refer to forest regeneration or development of agricultural crops. Change Vector Analysis was useful for detecting changes and it accepts the use of different parameters and considers their variation over time. As input data, the principal components are direct and rapid means for generating information of brightness and greenness of a particular scene. The principal components are feasible in studies involving the analysis of the variation of these parameters.

Key words: multisensors, change detection, principal component analysis, change vector analysis, agriculture

(1) Recebido para publicação em 25 de agosto de 2009 e aceito em 13 de maio de 2010.

(2) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto. E-mail: silviac@dsr.inpe.br; epiphanio@dsr.inpe.br

(*) Autor correspondente.

1. INTRODUÇÃO

A conversão das paisagens naturais para espaços destinados à agricultura pode ser monitorada por técnicas de sensoriamento remoto, mais especificamente por métodos de detecção de mudanças a partir de dados multitemporais. Detecção de mudanças refere-se ao processo que auxilia a determinação de alterações associadas ao uso e à cobertura do solo, com referência aos dados de sensoriamento remoto multitemporais (DIALLO et al., 2009). Para um diagnóstico de detecção de mudanças que englobe um longo período de tempo, dados provenientes de diferentes sensores são indispensáveis, visto que os dados de um único sensor podem não estar disponíveis para todo o período de interesse, em função da cobertura de nuvens ou do mau funcionamento dos sensores orbitais (LU et al., 2004). No caso do satélite Landsat, a inclusão de dados MSS (Multispectral Scanner System) torna-se necessária nas análises multitemporais que considerem períodos anteriores a 1984, quando foi lançado o sensor TM (Thematic Mapper), a bordo do Landsat-4. Entretanto, a combinação de dados multissensores exige procedimentos de pré-processamento de modo que seja possível associar informações derivadas de resoluções espacial, espectral e radiométrica distintas. Apesar da correlação entre as bandas dos sensores MSS, TM e CCD (Câmera Imageadora de Alta Resolução, a bordo do CBERS – China-Brazil Earth Resources Satellite), os limites das bandas não são diretamente coincidentes, o que implica dificuldades na padronização de imagens MSS a partir de dados TM, e vice-versa. Muitos dos algoritmos de detecção de mudanças não funcionam plenamente quando as bandas de um sensor não correspondem às bandas do outro (JENSEN, 2005).

Um enfoque para a distinção de tipos de cobertura da terra a partir de dados multitemporais é a Análise por Componentes Principais (ACP). A ACP é uma transformação de coordenadas pela rotação de eixos, que gera componentes que são somas ponderadas das bandas originais, assim como o Tasseled Cap, que gera os índices “brightness” (brilho) e “greenness” (verdor) relacionados, respectivamente, à variação espectral dos solos e ao vigor da vegetação (KAUTH e THOMAS, 1976; CRIST e CICONE, 1984). Os coeficientes da transformação Tasseled Cap são específicos para a região e data dos estudos originais e gerados por meio de ortogonalizações sucessivas dos eixos. Na ACP, os coeficientes também são oriundos de relações estatísticas entre as bandas, porém podem variar de um conjunto de imagens para outro (GLERIANI et al., 2003).

A Análise por Componentes Principais pode ser empregada no estudo multitemporal da dinâmica da paisagem, gerando imagens dos parâmetros brilho e verdor a partir da primeira e da segunda componentes

principais, respectivamente. As componentes resultantes de diferentes sensores podem ser combinadas, pois, em princípio, têm o mesmo significado, referindo-se ao brilho e ao vigor da vegetação (GLERIANI et al., 2003; LORENA et al., 2004; SIWE e KOCH, 2008).

Por outro lado, a Análise por Vetores de Mudanças (AVM) é uma técnica radiométrica que tem se mostrado eficiente na detecção de mudanças a partir de dados multissensores. Sua principal vantagem em relação a outras técnicas diz respeito à capacidade de processar e analisar simultaneamente várias bandas ou componentes espectrais. Vários trabalhos têm empregado a Análise por Vetor de Mudanças na detecção de mudanças, a partir de componentes de brilho e verdor geradas de formas diversas (ZHAN et al., 1998; PHUA et al., 2002; SILVA et al., 2003; SON et al., 2009). Esta técnica tem sido apropriada no estudo de alterações de uso e cobertura do solo, principalmente em florestas tropicais úmidas. De modo geral, são avaliadas a variação de fitomassa, a umidade e a exposição do solo, com o propósito de quantificar e caracterizar essas mudanças.

A hipótese deste trabalho é que a Análise por Componentes Principais minimize a consequência do cruzamento de dados oriundos de resoluções espectrais diferentes, e que é possível utilizá-la para gerar as componentes de brilho e verdor para qualquer conjunto de imagens de sensores de resolução moderada. A partir dessas componentes, a Análise por Vetores de Mudanças pode, então, fornecer informações sobre a intensidade e o tipo de mudança ocorrida. Os principais tópicos de análise são: a) avaliar a efetividade da adoção de dados multissensores em análises multitemporais; b) analisar a eficácia da Análise por Vetores de Mudanças na detecção de mudanças de cobertura do solo em uma região de Cerrado; c) avaliar o desempenho da Análise por Componentes Principais como fonte de dados para a Análise por Vetores de Mudanças.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O município de Chapadão do Céu (GO) foi selecionado como área de estudo por se constituir em uma região cujo histórico de interferências antrópicas no uso do solo desponta na década de 1970, ou seja, as alterações da paisagem, principalmente no que se refere à transição da vegetação nativa para áreas agrícolas, são contemporâneas aos primeiros dados do sensoriamento remoto orbital. Abrange uma área de preservação de remanescentes do Cerrado, como o Parque Nacional das Emas, além de fragmentos deste bioma, ao mesmo tempo em que é um dos municípios com maior produção agrícola do Estado de Goiás. O município de Chapadão do Céu está situado no extremo sudoeste do Estado de Goiás, a 480 km de Goiânia e tem 2.355 km²

de extensão, dos quais apenas 2 km² são urbanizados. Está inserido na Bacia do Rio Corrente a uma altitude de 840 m, no domínio geomorfológico dos planaltos e chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná, no domínio do Grupo São Bento. O relevo é predominantemente plano, com declividades inferiores a 3%, sendo este um fator propício ao uso agrícola das terras. As principais unidades pedológicas de uso agrícola são Latossolo Vermelho-Escuro álico (LEa), Latossolo Vermelho-Escuro distrófico (LEd), Gleissolo pouco úmido distrófico (HGPD) e Neossolo Quartzarênico órtico (AQa) (SGM-GO, 2005). Cerca de 32% de sua área total é constituída de áreas protegidas, incluindo parte do Parque Nacional das Emas, de reservas legais e de reservas permanentes. O índice pluviométrico médio anual é de aproximadamente 1.200 mm/ano, e a distribuição das chuvas não é uniforme ao longo do ano, ocorrendo predominância de precipitações pluviais de novembro a março. É caracterizado segundo a classificação de Köppen como Aw – tropical chuvoso de savana com inverno seco. A agricultura é a principal atividade econômica do município, sendo responsável por aproximadamente 70% do PIB (Produto Interno Bruto) local. A produção agrícola utiliza cerca de 58%

do território. As principais culturas são soja e milho, que corresponderam a 78% da produção de grãos; a cana-de-açúcar também tem sido cultivada com as perspectivas de aumento do mercado sucroalcooleiro e da produção de biodiesel. Segundo o Censo Agropecuário do IBGE, realizado em 2008 (<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>), Chapadão do Céu é um dos principais produtores de grãos do Estado de Goiás, ocupando o 6º lugar em produção e o 3º em proporção de área ocupada pela cultura de soja. Os procedimentos metodológicos estão sumarizados na figura 1.

As imagens utilizadas foram: MSS/Landsat (órbita/ponto 240/73, de 14/5/1975 e 2/5/1979), TM/Landsat (224/73, de 19/6/1985, 19/5/1991, 14/5/1995, 27/5/2000 e 30/3/2008) e CCD/CBERS-2 (161/21, de 11/5/2005, e 162/120 e 162/121, de 14/5/2005). Os critérios de seleção das cenas foram os seguintes: a cobertura de nuvens, a época do ano em que a vegetação nativa está mais vigorosa, o calendário agrícola regional e a proximidade sazonal. Para o processamento dos dados, foram consideradas as bandas com zonas comuns no espectro eletromagnético (0,5 a 1,1 µm), ou seja: canais 4 (verde), 5 (vermelho), 6 e 7 (infravermelho próximo) do sensor MSS/Landsat, canais 2 (verde), 3 (vermelho);

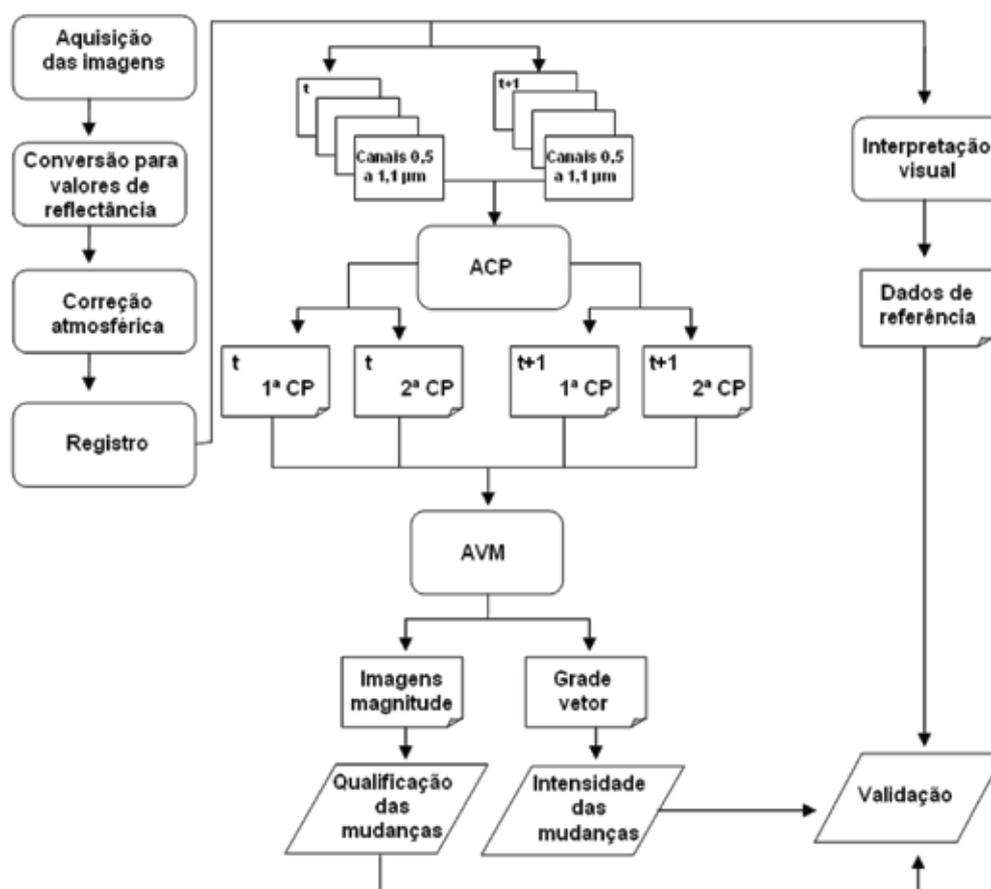


Figura 1. Fluxograma do roteiro metodológico utilizado no processamento das imagens e análises.

4 (infravermelho próximo) do sensor TM/Landsat; canais 2 (verde), 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo) da câmera CCD/CBERS-2.

Na época da aquisição das imagens, as principais safras já haviam sido colhidas. Muitas áreas de soja são aproveitadas para o plantio do milho safrinha. Entretanto, o objetivo deste trabalho foi o de averiguar o incremento das áreas agrícolas como um todo, e não quantificar cada tipo de produção. As bandas foram unificadas em um arquivo único para cada cena. Foi criado um banco de dados no software SPRING v. 4.3.3 para realizar operações algébricas sobre as imagens em ambiente LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico). Neste programa, os níveis digitais foram convertidos para radiância aparente, utilizando os coeficientes de calibração conforme MARKHAM e BARKER (1986), CHANDER e MARKHAM (2003) e PONZONI et al. (2007). A correção atmosférica foi realizada pelo método DOS (Dark Object Subtraction). Embora essa técnica considere apenas o fenômeno do espalhamento pela atmosfera (mais intenso nas bandas do visível), ela atendeu ao objetivo de manter as imagens com o mesmo *offset*, uma vez que não se pretendia caracterizar espectralmente os objetos na superfície terrestre. As imagens foram registradas com o objetivo de minimizar os efeitos de distorção e adequá-las a um sistema geodésico de referência. Foi usada como referência a base de dados de imagens pré-registradas disponibilizadas pela NASA (National Aeronautics and Space Administration). Para o registro das imagens de 2008, 2005, 2000 e 1995 utilizou-se o mosaico *Geocover* de imagens TM/Landsat adquiridas em 2000. Para as imagens de 1991 e 1985 utilizou-se a cena GLCF (*Global Land Cover Facility*) datada de 1989. As imagens de 1979 e 1975 foram registradas com base na cena GLCF de 1976. Empregou-se o algoritmo do vizinho mais próximo, de modo que o erro quadrático médio (RMS) fosse inferior a um pixel. Os pixels das imagens MSS e CCD foram reamostrados para 30 metros, de modo que fosse possível o cruzamento das informações multissensores. Todas as cenas apresentam a projeção UTM, datum SAD69.

A Análise por Componentes Principais foi realizada separadamente para cada cena, considerando os canais que compreendem o intervalo de 0,5 a 1,1 μm . Quando um cenário anual era composto por mais de uma cena, as principais componentes foram geradas individualmente para cada data, criando um mosaico para a reconstituição da área total do município. Os autovalores das componentes principais foram reescalados para valores entre 0 e 255, de modo que todas as imagens tivessem a mesma escala radiométrica. Para a geração das componentes principais (CP), considerou-se a matriz de correlação. A primeira e a segunda

componente principal de cada conjunto de dados foram consideradas como as representações de brilho e vigor vegetativo respectivamente. Essas componentes foram combinadas, definindo um novo sistema de coordenadas em que os parâmetros referem-se às propriedades de brilho e verdor. A variação da posição de um mesmo pixel em tempos sucessivos no espaço de atributos é o que determina a direção e a magnitude dos vetores de mudanças espectral.

A magnitude e a direção do vetor de mudança indicam, respectivamente, a intensidade e a natureza da mudança. Para gerar as informações dos vetores de mudanças, foram aplicadas as equações 1 a 3 a partir da primeira e segunda componente de cada par de datas, conforme apresentado em SILVA (2004):

$$\alpha = \arctg \left(\frac{CP1_{t+1} - CP1_t}{CP2_{t+1} - CP2_t} \right)$$

Para $(CP2_{t+1} - CP2_t) > 0$ (1)

$$\alpha = \arctg \left(\frac{CP1_{t+1} - CP1_t}{CP2_{t+1} - CP2_t} \right) + 3,14288$$

Para $(CP1_{t+1} - CP1_t) > 0$ (2)

$$\alpha = \arctg \left(\frac{CP1_{t+1} - CP1_t}{CP2_{t+1} - CP2_t} \right) - 3,14288$$

Para $(CP1_{t+1} - CP1_t) < 0$ (3)

A aplicação dessas equações gerou grades com valores de $-\pi$ a $+\pi$, ou seja, de -3,14 a +3,14. As direções resultantes foram fatiadas para a identificação das classes de mudanças em um mapa temático. Como foram utilizadas duas componentes de entrada para a determinação dos vetores de mudanças, foram obtidas quatro classes (2^2 classes) de direção de mudanças (LORENA et al., 2004). A direção pode ser negativa ou positiva, caso os níveis de cinza aumentem ou diminuam de uma data para outra, e relaciona-se a um tipo de mudança, de acordo com o deslocamento no espaço de atributos, que considera os valores de brilho e verdor. Na figura 2a são apresentadas situações em que certo ponto de origem no espaço de atributos (t_0), caracterizado pelos valores de brilho e verdor, muda de posição na data subsequente (t_1). Tal deslocamento é caracterizado por um vetor que pode assumir intensidades (magnitudes) variadas, e sua direção e sentido fornecem a informação de uma dada classe de mudança, de acordo com o quadrante em que o destino do vetor se encontra.

A magnitude dos vetores (V) foi determinada pelo cálculo da distância euclidiana entre a posição de um mesmo pixel em duas datas diferentes no espaço de atributos formado pela primeira e segunda componentes, segundo a Equação 4.

$$V = \sqrt{(CP1_{t-1} - CP1_t)^2 + (CP2_{t-1} - CP2_t)^2} \quad (4)$$

O cálculo da magnitude dos vetores foi realizado pixel a pixel para toda a imagem por programações em LEGAL. Foram tomados como dados de entrada a primeira e a segunda componente principal de cada par de datas (1975-1979, 1979-1985, 1985-1991, 1991-1995, 1995-2000, 2000-2005, 2005-2008, 1975-1991 e 1991-2008). Este procedimento resultou em imagens de magnitude com valores de 0 a 255, de modo que fosse possível comparar os resultados de todos os intervalos temporais considerados.

As imagens de brilho e verdor foram usadas como dados de entrada para a Análise por Vetores de Mudanças, gerando informações sobre dois níveis de mudança entre os pares de anos analisados: 1) informação binária de mudança ou não-mudança, a partir de um limiar de alterações nas imagens de magnitude; e 2) informação sobre o tipo de alteração, de acordo com o sentido do vetor de mudanças.

Foram calculados a média e o desvio-padrão de cada uma das grades de magnitude e, a partir desses valores, foi estabelecido o limiar de mudanças. Para a definição da magnitude das mudanças, foram atribuídas três classes de intensidade: não-mudança, mudança "suave" ou "grande" mudança, de acordo com o valor do pixel na imagem de magnitude de mudanças. A Figura 2b esquematiza as mudanças de acordo com o valor de magnitude do vetor, considerando a média (μ) e o desvio-padrão (σ) das imagens resultantes.

Na definição do limiar de mudanças, foi adotado inicialmente o valor de um desvio-padrão dos valores da imagem de magnitude. Foi definido se houve ou não mudança entre os períodos, e se o limiar de um desvio-padrão seria o ideal para a identificação das mudanças, de acordo com a porcentagem de acertos sobre a informação binária de mudança. No caso de alvos com semelhanças espectrais (por exemplo, campo limpo em um período e solo na data subsequente), optou-se por considerar a condição que aumentasse a proporção de acertos. O mesmo critério foi adotado para áreas de transição (por exemplo, estradas adjacentes a solo e cultura densa).

Para ajustar o valor do limiar de mudanças, foi criada uma Tabela de Validação com a informação

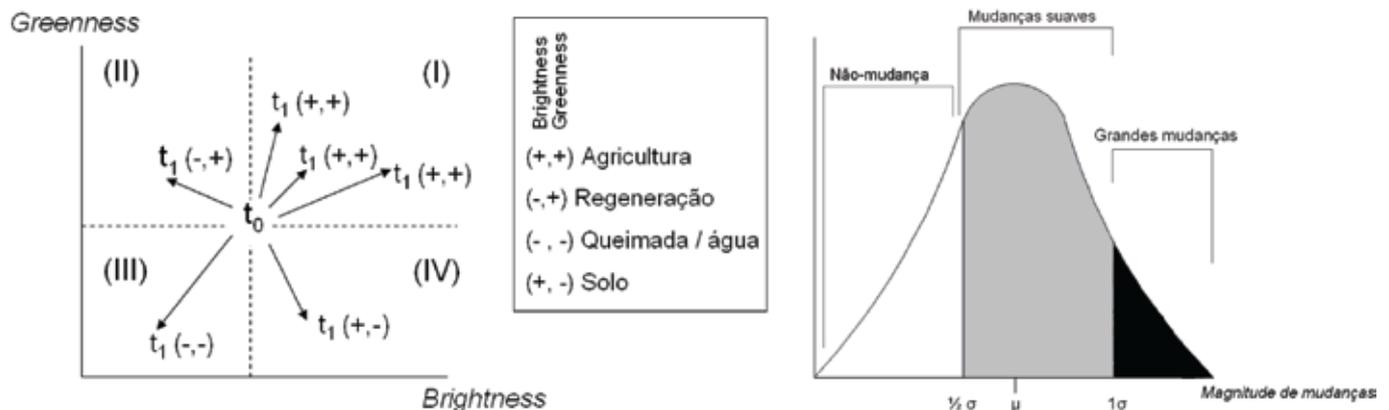


Figura 2. a) Direção dos vetores e respectivas classes de mudanças. b) Atribuição de classes de intensidade de mudança, de acordo com o valor de magnitude.

Tabela 1. Tabela de Validação com a informação binária de mudança (Exemplo)

Ponto	Interpretação visual		AVM		Acertos	Erros		
	1975	1979	Houve mudança? 0 = não 1=sim	Valor da magnitude de mudanças (0 a 255)		Houve mudança? 0 = não 1=sim	comissão	omissão
1	Veget. nativa	Veget. nativa	0	12	1	0	1	0
2	Veget. nativa	Solo	1	29	1	1	0	0
...
100	Solo	Solo	0	37	1	0	1	0
Total						79	13	08

binária de mudança (Tabela 1). As informações sobre as mudanças de uso do solo foram obtidas a partir da interpretação visual da composição RGB de cada cena para todo o intervalo temporal estudado. Este método de geração dos dados de referência substituiu os trabalhos de campo por se tratar de uma alternativa rápida e sem custos para obtenção de dados de referência.

Esse método tornou-se obrigatório em função da inexistência de mapas temáticos para a análise de longas séries temporais. É um procedimento que não necessita de grande suporte técnico e não requer elevados níveis de processamento de dados para a obtenção de métodos de referência. Além disso, a legenda era muito simplificada, pois o objetivo não era fazer uma interpretação refinada de cada uso do solo. A tabela 1 (mostrada parcialmente) fornece informações sobre as classes de uso do solo em 100 pontos (pixels) selecionados aleatoriamente para todos os períodos (1975, 1979, 1985, 1991, 1995, 2000, 2005 e 2008). Esses dados foram confrontados com a informação binária (mudança/não-mudança) fornecida pelo limiar de mudança, considerado inicialmente como desvio-padrão. Os erros de omissão e comissão foram avaliados a fim de ajustar o valor do limiar de mudança. Foram considerados erros de omissão os casos em que houve mudanças segundo os dados de referência, mas o valor do vetor de mudanças para aquele ponto era inferior ao limiar estabelecido. Os casos de comissão constituíram os eventos em que o dado de referência indicava não-mudança, mas o valor do vetor de mudanças era superior ao limiar definido.

Os valores de níveis de cinza da imagem magnitude foram discretizados, o que permitiu a produção de mapas temáticos. A partir de programações em LEGAL, as informações sobre a magnitude de mudanças foram combinadas com as informações sobre o tipo de alteração ocorrida com as classes: "não-mudança", "mudança suave" e "grande mudança". Em seguida, pela união dos dois tipos de informação, foram produzidos mapas temáticos com as classes: "não-mudança", "regeneração, suave", "regeneração, grande", "cultura, suave", "cultura, grande", "queimada/água, suave", "queimada/água, grande", "desmatamento, suave", "desmatamento, grande".

Para avaliar a acurácia do método de detecção de mudanças empregado, utilizou-se a Tabela de Validação. Para cada ponto, dois níveis de informação foram estabelecidos: o primeiro nível envolve a informação binária de mudança ou não-mudança, e o segundo descreve a natureza da mudança. Essas informações foram tabuladas e comparadas com a técnica de detecção de mudanças empregada neste trabalho, por meio de uma matriz de confusão. As informações referentes à ocorrência de mudança foram originadas a partir da definição de um limiar sobre o vetor de mudanças.

Também foram gerados dados sobre os erros de omissão ou comissão nesta classificação de mudanças.

A detecção do tipo de mudança também foi avaliada pela interpretação visual (dados de referência), que foi confrontada com as informações fornecidas pela direção do vetor de mudanças, ou seja, pela combinação das variações de brilho e verdor. A matriz de erros e a análise pelo coeficiente Kappa (CONGALTON, 1991) foram utilizadas para avaliar a acurácia da detecção do tipo de mudanças. A acurácia do método empregado, de acordo com os valores de Kappa, foi avaliada de acordo com a classificação proposta por LANDIS e KOCH (1977). A partir da comparação dos valores de Kappa para os períodos 1975-1979 (MSS-MSS), 1979-1985 (MSS-TM), 1991-1995 (TM-TM) e 2005-2008 (TM-CCD), foi avaliada a eficiência do uso dos dados multissensores para a detecção de mudanças ao longo do tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação à informação binária de mudança, relacionada com a alteração na cobertura da terra, a porcentagem de acertos variou de 68% a 81%. O cálculo dos vetores de mudanças resultou em grades com valores que variam de $-3,14$ a $+3,14$, ou $-\pi$ a $+\pi$. Essas grades foram divididas de acordo com a tabela 2, de modo que foi possível identificar as mudanças em um mapa temático. O valor do vetor está relacionado com a variação do uso do solo nas datas t e $t+1$.

Entretanto, os resultados foram avaliados em termos de variação de brilho e verdor, e não na simples identificação de mudanças para uma classe determinada. Por exemplo, as modificações relacionadas ao brilho podem ser resultantes das condições radiométricas no momento da aquisição das imagens, e as alterações relacionadas ao verdor, decorrentes da intensidade do incremento da fitomassa, ou em áreas agrícolas ou em vegetação nativa. Mesmo áreas onde não houve mudança de uso, como matas ciliares, pode haver comportamento variável, em função de alterações fenológicas e hidrológicas. As classes de mudança para "Regeneração" e "Agricultura" devem ter valores mais altos na segunda componente principal, associada ao verdor da vegetação. A classe "Regeneração" acusa áreas em que a fitomassa cresceu a ponto de produzir

Tabela 2. Direção dos vetores de mudanças e respectivas classes

Mudança	Intervalo
Agricultura	$I = 0,00$ a $+1,57$ ou 0 a $\pi/2$
Solo	$II = +1,57$ a $3,14$ ou $\pi/2$ a π
Queimada	$III = -3,14$ a $-1,57$ ou $-\pi$ a $-\pi/2$
Regeneração	$IV = -1,57$ a $0,00$ ou $-\pi/2$ a 0

sombra, diminuindo o valor de brilho, característica que pode ser avaliada pela primeira componente principal. Nas áreas com sinais de queimadas ou com solo irrigado há baixos valores de reflectância e, portanto, com baixos valores na primeira componente principal. Em geral, os corpos d'água não possuem fitomassa que possa ser identificada pela imagem de verdor, com exceção daqueles em que a mata ripária seja abundante.

Os produtos desses processamentos foram, portanto, as imagens de magnitude, o mapa temático que indica as direções de mudanças, e o mapa resultante do cruzamento destas duas, para cada um dos períodos considerados. A figura 3 representa a imagem de magnitude de mudanças e o mapa temático da direção de mudanças referentes ao período de 1991 a 1995. As regiões identificadas como "não-mudança" ou baixa mudança referem-se a alvos cuja dinâmica ao longo do ano é mais constante, como as áreas de veredas e parte do Parque Nacional das Emas (região escura a noroeste), cujas modificações se devem à sazonalidade da vegetação natural e podem não estar relacionadas com as mudanças de cobertura do solo propriamente ditas. Essas imagens de mudança e de direção de

mudança foram geradas para cada par de anos (intervalo temporal) analisado (dados não apresentados).

O tipo de mudança indicado pela direção do vetor de mudanças foi comparado com o tipo de mudança observado pela interpretação visual (dado de referência). Para cada um dos pontos que foram identificados como "mudança", ou seja, ficaram acima do limiar na análise anterior, foram identificados os tipos de alteração esperado e observado. Tais ocorrências foram contabilizadas, como delineado na tabela 1.

Em relação à escala temporal, os períodos que abrangem maior intervalo (1975 a 1991 e 1991 a 2008) - e envolvem pares de sensores diferentes - apresentaram acurácia boa ou razoável. Este trabalho revelou resultados similares ao analisar os períodos em que são utilizados sensores semelhantes ou os mesmos sensores (p.ex., TM-TM). Esta homogeneidade dos resultados não é decorrente da adoção de limiares de alteração, visto que estes interferem apenas na informação binária de mudança ou não-mudança. Na Tabela 3, nota-se uma avaliação da acurácia do método, de acordo com classificação de LANDIS e KOCH (1977).

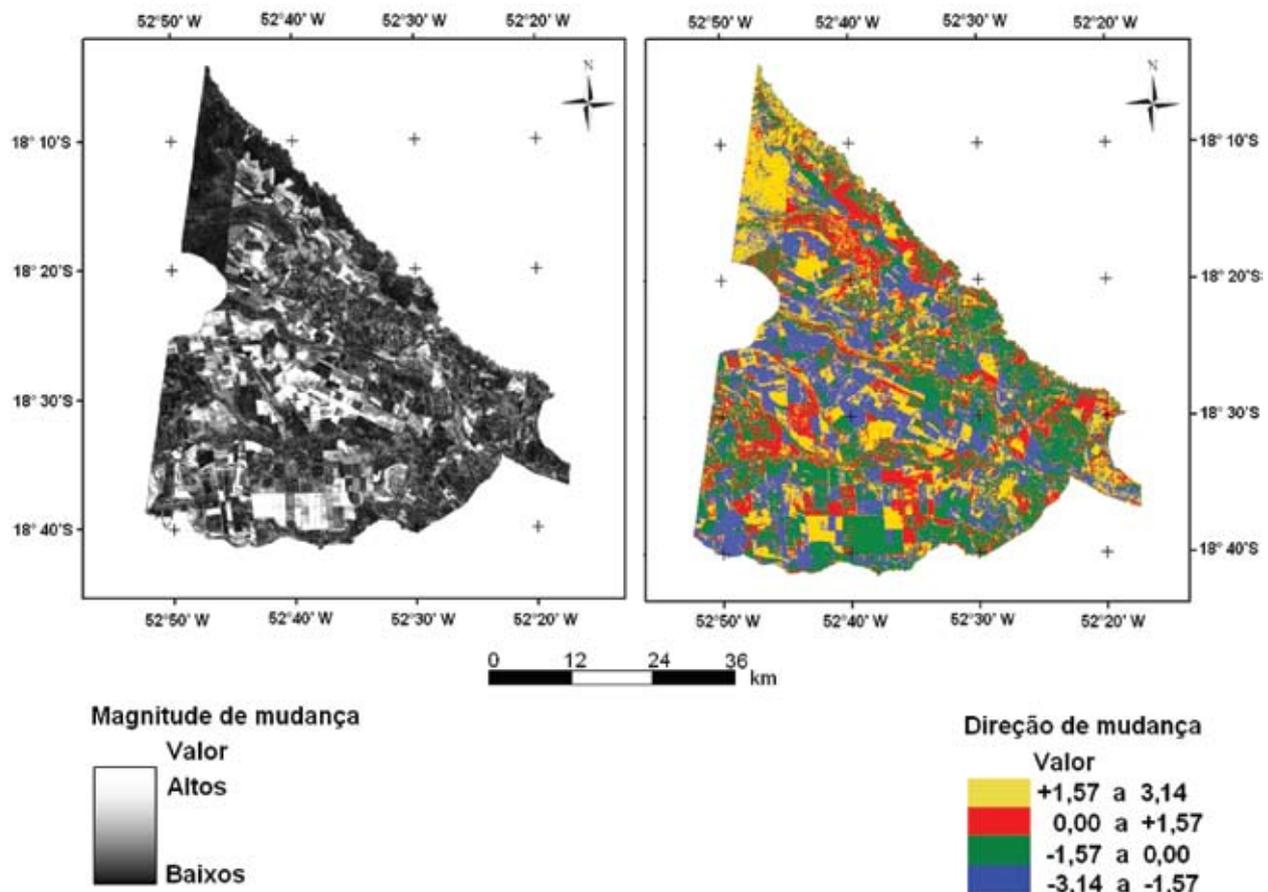


Figura 3. Imagens de magnitude e direção de mudanças ocorridas entre 1991 e 1995.

Os testes Qui-Quadrado, com o nível de significância de 5% aplicados para analisar o quanto os valores observados diferiram dos valores esperados, para cada intervalo temporal analisado, mostraram que o resultado da Análise por Vetores de Mudanças é superior a uma classificação aleatória para todos os períodos.

A avaliação da acurácia das técnicas de detecção de mudanças foi comprometida pela dificuldade da aquisição de mapas-base de referência que assegurassem a validação dos métodos, principalmente quando são considerados dados multitemporais. Não obstante, o uso de pontos amostrais permitiu a definição dos limiares de mudança e a análise dos erros de omissão e comissão.

Tabela 3. Classificação da acurácia da AVM para os períodos considerados

Período	Dados multissensores	Concordância simples	Concordância ao acaso	Kappa	Classificação da acurácia
1975-1979	Não	0,557	0,343	0,33	Razoável
1979-1985	Sim	0,580	0,301	0,41	Boa
1985-1991	Não	0,431	0,309	0,18	Fraca
1991-1995	Não	0,444	0,235	0,27	Razoável
1995-2000	Não	0,486	0,273	0,29	Razoável
2000-2005	Sim	0,542	0,250	0,39	Razoável
2005-2008	Sim	0,518	0,252	0,36	Razoável
1975-1991	Sim	0,470	0,269	0,27	Razoável
Geral	-	0,513	0,263	0,34	Razoável

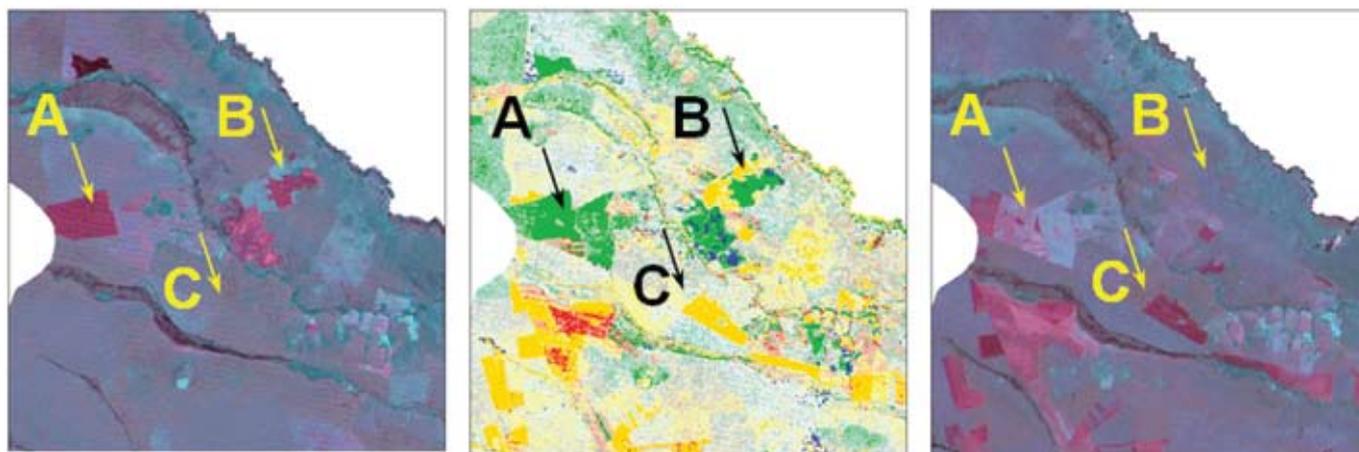


Figura 4. a) e c) Imagens MSS/Landsat; composição R(2)G(4)B(3); datas de aquisição: 14/05/1975 (a) e 02/05/1979 (c). b) Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1975 a 1979.

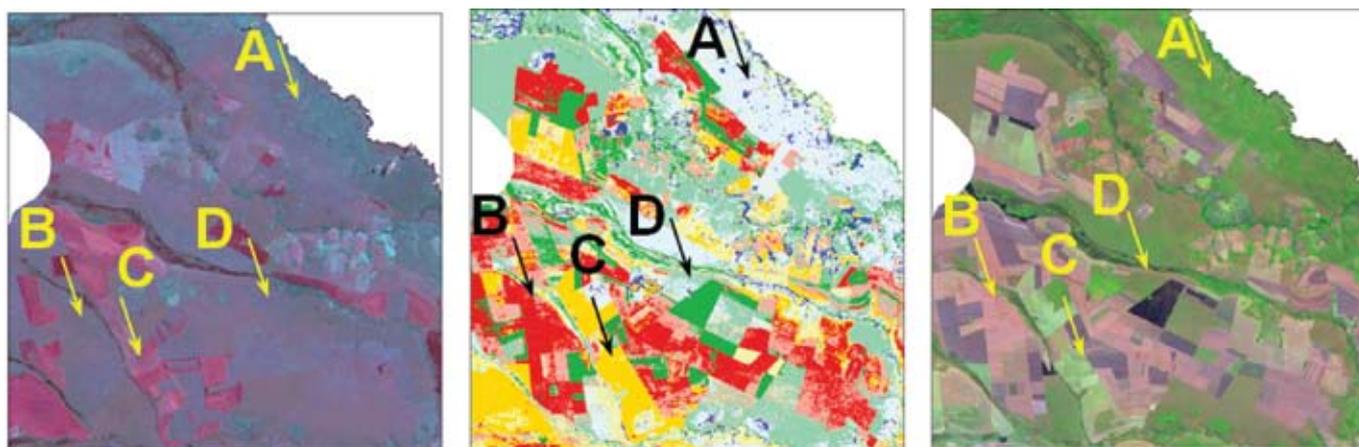


Figura 5. a) Imagem MSS/Landsat; composição R(2)G(4)B(3); data de aquisição: 14/05/1975. b) Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1979 a 1985. c) Imagem TM/Landsat; composição R(5)G(4)B(3); data de aquisição: 19/06/1985.

Na figura 4, observam-se regiões onde houve mudança de solo para vegetação, com identificação correta de regeneração (ponto A). Regiões que tiveram a cobertura vegetal reduzida (pontos B e C) também podem ser visualizadas.

Há regiões em que as mudanças estão associadas apenas a variações fenológicas (Figura 5, ponto A) e que exibem redução na componente brilho em função do desenvolvimento da vegetação e aumento de sombra. O mapa referente ao período de 1979 a 1985 (Figura 5) também acusa mudanças equivocadas, como a identificação de áreas agrícolas onde há transição para solo exposto (ponto B), e também o contrário (ponto C). O ponto D identifica como “regeneração” uma área que foi queimada. Na figura 6, em que são identificadas as mudanças do período de 1985 a 1991, o mesmo talhão na figura 5 é representado corretamente como regeneração (ponto B). Este mapa temático exhibe regiões de confusão entre culturas agrícolas e

solo preparado (ponto A), além da identificação de intensa redução de brilho por conta do incremento da vegetação (ponto C).

A transição de áreas cultivadas para solo preparado (Figura 7, ponto A) é exibida no mapa temático referente ao período de 2000 a 2005. Foi bastante comum a identificação de áreas de regeneração onde, na realidade, estão localizadas áreas cultivadas em estágio avançado com formação de sombras (Figura 7, ponto B). Neste período, a expansão da atividade agrícola já está estabilizada e, portanto, há grandes áreas que são identificadas como “não-mudança”. De modo geral, os erros se devem a confusões espectrais associadas à cobertura do solo natural ou antrópica, tal como campo sujo e pasto, além de incrementos na biomassa vegetal, que podem se referir à regeneração florestal ou desenvolvimento de culturas agrícolas. A diminuição do brilho também pode resultar em equívocos, com a indicação duvidosa de queimadas ou umidade.

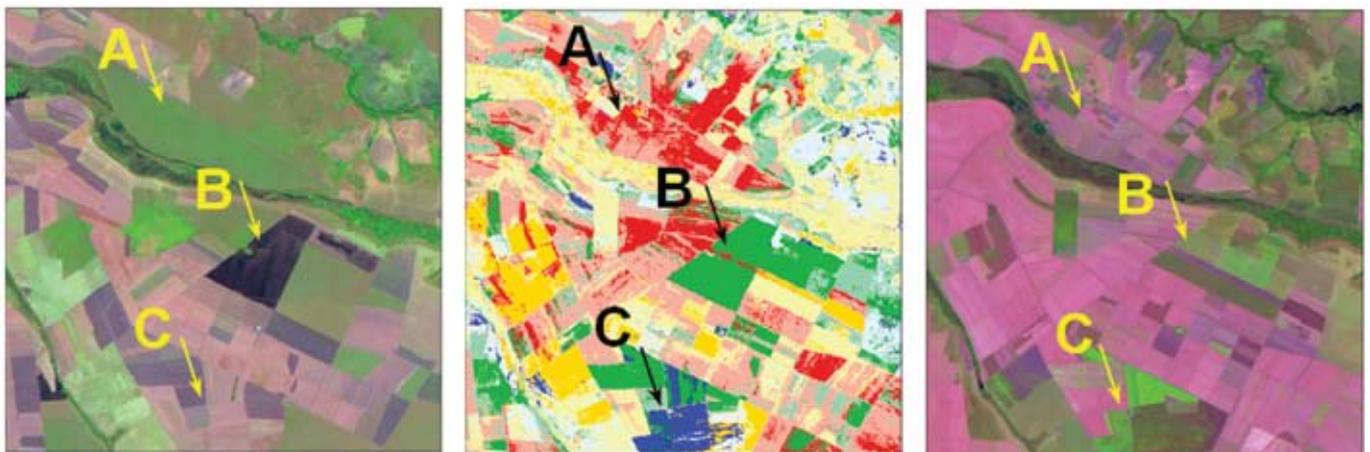


Figura 6. a) e c) Imagens TM/Landsat; composição R(5)G(4)B(3); datas de aquisição: 19/06/1985 (a) e 19/05/1991 (c). b) Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 1985 a 1991.

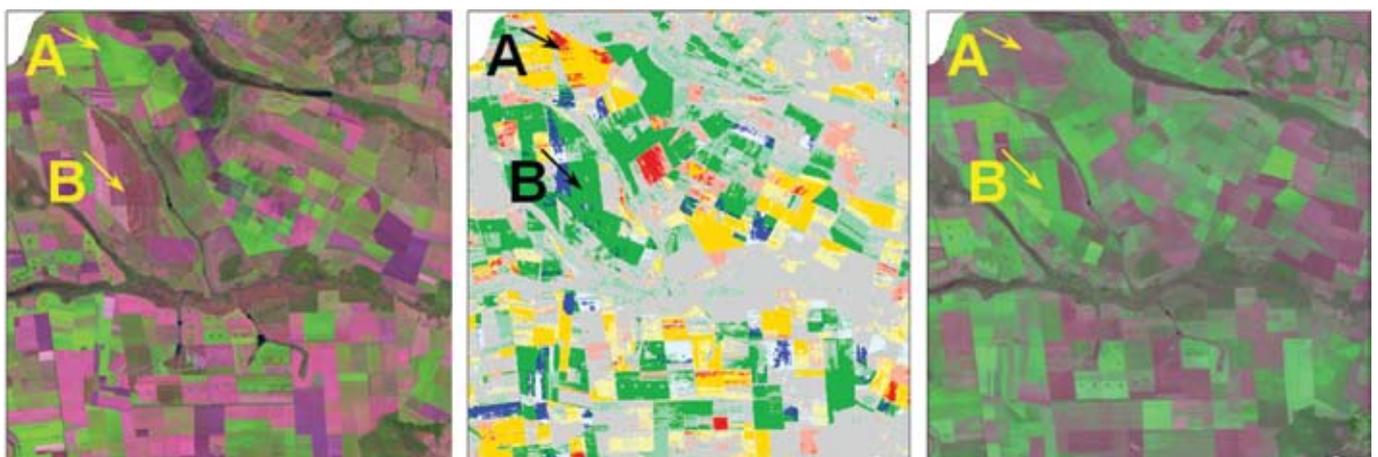


Figura 7. (a) Imagem TM / Landsat; composição R(5)G(4)B(3); data de aquisição: 27/05/2000. (b) Detalhe das classes de mudanças ocorridas no período de 2000 a 2005. (c) Imagem CCD/CBERS 2; composição R(3)G(4)B(2); data de aquisição: 14/05/2005.

Foram frequentes as confusões entre classes de mudanças de quadrantes adjacentes. Por exemplo, Solo – Agricultura (I), Agricultura – Regeneração (IV), Regeneração – Queimada ou água (III). Provavelmente, o estabelecimento de limites rígidos não é adequado na definição das classes, sendo necessário verificar com maior detalhamento os valores da direção dos vetores para cada uma das classes. Em princípio, as alterações identificadas como queimadas ou corpos d'água não estão associadas a mudanças de uso do solo, mas sim a pequenas variações no nível de cinza das imagens. Algumas variações também se devem a questões de deterioração radiométrica, isto é, a diferenças no desempenho radiométrico dos sensores ao longo do tempo, entre as bandas ou detectores. Os coeficientes de calibração usados na transformação dos números digitais para valores de reflectância podem estar defasados para as imagens atuais, e não são específicos para esta região de estudo. Porém, este aspecto esteve fora do escopo deste estudo.

Pode haver ainda ocasiões em que há variação em apenas um dos parâmetros de análise, neste caso, brilho ou verdor, identificado pela primeira ou segunda componentes principais respectivamente. Por exemplo, a transição de biomassa densa para agricultura implicaria alteração no brilho, mas o verdor pode permanecer constante. Deste modo, eventuais conflitos na identificação das alterações do uso do solo podem ocorrer. Por exemplo, a transição de fitomassa densa para queimada ou corpo d'água pode apresentar o mesmo resultado que a conversão de cultura para solo, pois ambas as condições implicam na diminuição do verdor e conservação da intensidade do brilho. Na tabela 4, são indicadas as situações de confusão na Análise por Vetores de Mudanças, quando são utilizadas as componentes principais como dados de entrada.

A aplicação deste algoritmo pode ser útil na detecção de mudanças em outras regiões, dado que outros autores têm empregado com sucesso as componentes de brilho e verdor na Análise por Vetor de Mudanças. Além da Análise por Componentes Principais, estas componentes podem ser geradas por diferentes técnicas de processamento de imagens orbitais: Análise de Decomposição de Padrões (PHUA et al., 2002), Modelo Linear de Mistura Espectral (SILVA et al., 2003), transformação Tasseled Cap (LORENA et al., 2004; LUNETTA et al., 2004; SIWE e KOCH, 2008) e índices espectrais (SON et al., 2009). Entretanto, poucas análises (PHUA et al., 2002) consideram o uso de dados multissensores para longas séries temporais, isto é, períodos superiores a 20 anos.

Grande parte dos trabalhos previamente realizados contempla mudanças em florestas tropicais (ZHAN, 1998; PHUA et al., 2002; SILVA et al., 2003; LORENA et al., 2004; SON, 2009) ou temperadas (LUNETTA et al., 2004), que são espacialmente mais heterogêneas e ecologicamente mais estáveis em relação aos ecossistemas savânicos. Esta observação é importante dado que o grau de heterogeneidade da paisagem depende da escala de análise (LAMBIN e STRAHLER, 1994; LUNETTA et al., 2004), e estes estudos utilizam imagens orbitais de média resolução. Além disso, a consideração da existência de áreas agrícolas em diferentes estádios fenológicos é outro fator que dificulta a caracterização destas mudanças. A acurácia dos algoritmos de detecção de mudanças fica condicionada, portanto, às características da área de estudo.

Uma causa importante de certas ambiguidades na análise multitemporal aplicada ao estudo de mudanças no uso da terra é a definição da legenda. Isso é importante, pois há dois elementos fundamentais que participam da atribuição de uma determinada classe de legenda a uma porção do terreno: o analista e o sensor. O

Tabela 4. Situações de ambiguidade na identificação de mudanças

Uso do solo		Parâmetro alterado
Data t	Data t +1	
Fitomassa densa (BR-, GR+)	Cultura (BR+, GR+)	Brilho aumenta
Fitomassa densa (BR-, GR+)	Cicatriz de queimada / água (BR-, GR-)	Verdor diminui
Cultura (BR+, GR+)	Fitomassa densa (BR-, GR+)	Brilho diminui
Cultura (BR+, GR+)	Solo (BR+, GR-)	Verdor diminui
Solo (BR+, GR-)	Cultura (BR+, GR+)	Verdor aumenta
Solo (BR+, GR-)	Cicatriz de queimada / água (BR-, GR-)	Brilho diminui
Cicatriz de queimada / água (BR-, GR-)	Fitomassa densa (BR-, GR+)	Verdor aumenta

primeiro elemento, com base em uma legenda definida, atribui uma porção do terreno a uma determinada classe. Neste caso, por exemplo, uma cultura em estágio inicial de desenvolvimento pode estar na mesma classe "agricultura" que uma cultura em pleno desenvolvimento ou mesmo em senescência. Porém, o segundo elemento, que é o sensor propriamente dito, receberá diferentes níveis de radiância multiespectral próprios de cada uma daquelas fases de desenvolvimento da cultura. Com isso, embora a classe de uso do solo "agricultura" não se altere durante o período analisado a partir da perspectiva do analista, ela passa por sensíveis mudanças radiométricas multiespectrais a partir da perspectiva do sensor ou produto de sensoriamento remoto. A dificuldade analítica amplia-se ao considerar que o calendário biofísico natural e o manejo agrícola intra e entre anos é variável, somado à não-coincidência das datas de aquisição interperíodos dos produtos de sensoriamento remoto. Portanto, as análises de mudança do uso da terra por meio de sensoriamento remoto, particularmente quando se tratar de áreas extensivas e períodos longos, necessitam de aprofundamento tanto em termos de desenvolvimento de novas técnicas de análise multitemporal como de entendimento da dinâmica natural e antrópica para a construção das classes de legenda.

4. CONCLUSÕES

1. As componentes de brilho e verdor geradas a partir da Análise por Componentes Principais são úteis como dados de entrada para a Análise por Vetores de Mudanças em séries temporais longas.

2. O método empregado é de eficiência mediana na identificação de alterações de uso do solo, com desempenho superior a uma classificação aleatória, conforme a análise estatística utilizada.

3. A aplicação de dados multissensores para a detecção de mudanças no uso da terra ao longo do tempo é tão eficiente para o método avaliado quanto a combinação de dados de um mesmo sensor. A comparação de maior número de períodos, mesmo que para intervalos menores, de modo que seja possível analisar os resultados estatisticamente, pode fornecer informações mais consistentes a esse respeito.

REFERÊNCIAS

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, p.2674-2677, 2003.

CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, p.35-46, 1991.

CRIST, E.P.; CICONE, R.C. A physically-based transformation of Thematic Mapper data – the TM tasseled cap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.GE-22, p.256-263, 1984.

DIALLO, Y.; HU, G.; WEN, X. Applications of remote sensing in land use / land cover change detection in Puer and Simao Counties, Yunnan Province. **Journal of American Science**, v.5, p.157-166, 2009.

GLERIANI, J.M.; ANTUNES, M.A.H.; EPIPHANIO, J.C.N. Coeficientes da transformação espectral tasseled cap para uma cena com predomínio de latossolo roxo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p.101-107.

JENSEN, J.R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 3. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2005. 526 p.

KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat. In: Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, 1976, West Lafayette, Indiana. **Proceedings ...** West Lafayette: [s.n.], 1976. p.41-51.

LAMBIN, E.F.; STRAHLER, A.H. Indicators of land cover change for change vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, p. 2099-2119, 1994

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, p.159-174, 1977.

LORENA, R.B.; SANTOS, J.R.; SHIMABUKURO, Y.E. Técnica de detecção de mudanças aplicada em imagens de satélite como ferramenta de monitoramento de uso e cobertura da terra na Amazônia Ocidental (Acre). **Espaço e Geografia**, v.7, p.47-76, 2004.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, p.2365-2407, 2004.

LUNETTA, R.S.; JOHNSON, D.M.; LYON, J.G.; CROTWELL, J. Impacts of imagery temporal frequency on land-cover change detection monitoring. **Remote Sensing of Environment**, v.89, p.444-454, 2004.

MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. **EOSAT Landsat Technical Notes**, n.1, p.3-8, 1986.

PHUA, M.H.; FURUYA, N.; TSUYUKI, S. Detecting deforestation in the tropics using change vector analysis with pattern decomposition coefficients. In: Asian Conference on Remote Sensing, 23., 2002, Nepal. **Proceedings ... Nepal: Association on Remote Sensing**, 2002. 6 p. Disponível em: <<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/for/191.pdf>>. Acesso em: 1.º mar. 2010.

PONZONI, F.J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAMPARELLI, R.A.C. Calibração absoluta da câmera CCD/CBERS-2. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiás. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p.1067-1074.

SGM-GO – Superintendência de Geologia e Mineração do Estado de Goiás. **Mapa de Solos do Plano Diretor da Bacia do Rio Paranaíba**. SE.22-Y-A / SE.22-Y-B. Goiás, 2005. Escala: 1:250000. Disponível em <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acesso em 1.º maio 2008.

SILVA, P.G.; SANTOS, J.R.; SHIMABUKURO, Y.E.; GRAÇA, P.M.; SOUZA, P.E.U. Change vector analysis technique to monitor selective logging activities in Amazon tropical rainforest. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4., 2003, Toulouse. **Proceedings ...** Toulouse: IEEE, 2003. p.2580-2582.

SIWE, R.N.; KOCH, B. Change vector analysis to categorize land cover change processes using the tasseled cap as biophysical

indicator. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.145, p.227-235, 2008.

SON, T.S.; LAN, P.T.; CU, P.V. Land cover change analysis using Change Vector Analysis method in Duy Tien District, Ha Nam Province in Vietnam. In: FIG Regional Conference, 7., 2009, Vietnam. **Proceedings ...** Vietnam: Fédération Internationale des Géomètres, 2009. 9 p. Disponível em: <http://www.fig.net/pub/vietnam/papers/ts01g/ts01g_son_et_al_3666.pdf>. Acesso em: 1.º mar. 2010.

ZHAN, X.; HUANG, C.; TOWNSHEND, J.; DEFRIES, R.; HANSEN, M.; DIMICELLI, C.; SOHLBERG, R.; HEWSON-SCARDELLETTI, J.; TOMPKINS, A. Land cover change detection with change vector in the red and near-infrared reflectance space. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2., 1998, Seattle. **Proceedings ...** Seattle: IEEE, 1998. p.859-861. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00699607>>. Acesso em: 1.º mar. 2010.