

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO E MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL NO MONITORAMENTO DA REGIÃO DO PANTANAL¹

YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO², EVLYN MORAIS NOVO³ e FLÁVIO JORGE PONZONI²

RESUMO - Este trabalho apresenta a contribuição da imagem índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) e das imagens-fração derivadas de modelo linear de mistura espectral para o monitoramento da dinâmica da cobertura do solo na região do Pantanal. As imagens índice de vegetação e as imagens-fração (vegetação, solo e sombra ou água) foram derivadas dos dados digitais do TM (Thematic Mapper) do Landsat obtidos sobre a região do alto Taquari (MS), em 22 de dezembro de 1992 (período seco) e 12 de março de 1993 (período chuvoso). Estas imagens permitiram analisar a cobertura de solo da região nas datas das imagens, bem como detectar as mudanças ocorridas entre o período de aquisição dessas imagens. Aparentemente, os resultados indicaram maior sensibilidade da imagem-fração de vegetação às variações de cobertura vegetal do solo quando comparada com a imagem índice de vegetação (NDVI). O método de retificação radiométrica apresentou bom desempenho, indicando que tanto os alvos escuros quanto os alvos claros, selecionados nas imagens, não sofreram mudanças durante o intervalo de aquisição das imagens.

Termos para indexação: Landsat TM, cobertura vegetal, retificação radiométrica, NDVI, imagens-fração.

VEGETATION INDEX AND SPECTRAL LINEAR MIXING MODEL FOR MONITORING THE PANTANAL REGION

ABSTRACT - This paper presents the contribution of the normalized difference vegetation index (NDVI) and the fraction images derived from linear mixing model for monitoring the dynamic of the land cover in the Pantanal region. The vegetation index and the vegetation, soil, and shade or water fraction images were derived from Landsat TM (Thematic Mapper) digital data acquired over the alto Taquari (MS) region, on December 22, 1992 (dry season) and on March 12, 1993 (rainy season). These images permitted to analyze the land cover in this region for the image dates, as well as to detect changes occurred during the period of image acquisition. The results indicated an apparent higher sensitivity of vegetation fraction image to land cover variation when compared to vegetation index image. The radiometric rectification method presented a good performance, indicating that the selected dark and bright targets in the images have not changed in the interval between dates of image acquisition.

Index terms: Landsat TM, vegetation cover, radiometric rectification, NDVI, fraction images.

INTRODUÇÃO

O monitoramento dos recursos naturais em regiões extensas e de difícil acesso, como é o caso da região do Pantanal, pode ser otimizado através do uso de métodos de sensoriamento remoto. Estes métodos incluem o processamento de imagens

digitais, visando as estimativas quantitativas de alterações ocasionadas por fatores naturais ou antrópicos. Um elemento fundamental na detecção de mudanças na cobertura vegetal, a partir de imagens orbitais, consiste em distingui-las de modificações inerentes à cena imageada, derivadas de mudanças ambientais e atmosféricas. As alterações na cobertura vegetal do solo podem ser detectadas através da análise de imagens orbitais transformadas nas chamadas imagens-fração (IF) e imagens índice de vegetação (IV). As IF's contêm informações sobre as proporções dos componentes puros, como vegetação, solo e sombra ou água.

¹ Aceito para publicação em 26 de fevereiro de 1998.

² Eng. Florestal, D.Sc., Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR), Av. dos Astronautas, 1758, CEP 12227-010 São José dos Campos, SP. E-mail: yosio@ltd.inpe.br

³ Geógrafa, D.Sc., INPE/DSR.

Teoricamente, as IF's quando comparadas com as IV's são menos sujeitas às variações de fatores, como condições de iluminação da cena e de variações atmosféricas.

O objetivo deste trabalho é avaliar a contribuição das imagens-fração, derivadas de um modelo linear de mistura espectral, e das imagens índice de vegetação para o monitoramento da dinâmica da cobertura vegetal da região do Pantanal.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo está localizada no Estado do Mato Grosso do Sul, contida na folha SE.21-Z-B-II, denominada Pedro Gomes, abrangendo uma superfície de aproximadamente 3.030 km². Está compreendida pelas coordenadas geográficas de 18° 00' 00" e 18° 30' 00" de latitude Sul e 54° 30' 00" e 55° 00' 00" de longitude Oeste.

A região apresenta parte de duas unidades geomorfológicas dominadas pela planície do Pantanal e pelos planaltos (Brasil, 1982). A planície do Pantanal é uma área de características extremamente peculiares que definem uma paisagem própria. Possui terrenos quaternários aluviais em altitudes abaixo de 200 m. A despeito do que muitos pensam, não é uma área permanentemente alagada, semelhante a um pântano, mesmo no período das cheias. Na época das chuvas, a área pantaneira assume o aspecto de alagado, em consequência do transbordamento das calhas dos rios componentes da bacia do rio Paraguai. Na medida em que o nível da água dos rios começa a baixar, o quadro hidrográfico assume sua feição natural, os rios se restringem aos seus respectivos leitos e o lençol freático desce para mais de 10 m de profundidade. Os solos são formados, sobretudo, por lateritas hidromórficas com manchas de latossolos e podzólicos. Nos planaltos predominam as areias quartzosas, latossolo vermelho-escuro e podzólico álicos com baixo grau de fertilidade. A vegetação dominante é de savana com formações vegetais que variam de densa a gramíneo-lenhosa. Possui no seu conteúdo agrupamentos florestais semidecíduais e decíduais. As formas lenhosas encontram-se quase sempre em contato, ora com a floresta estacional, ora com a savana.

A leste, margeando a planície do Pantanal, há escarpas das serras do Maracaju e do Pantanal. Os planaltos a leste desta área são todos do Paleozóico, com rochas do Cretáceo. A área serrana e os planaltos residuais, geologicamente, são considerados pré-cambrianos. A hidrografia é formada por dois rios principais,

denominados Taquari e Coxim, além de outros rios que compõem esta bacia, com suas respectivas nascentes situadas nos mais diferentes pontos da área.

As atividades de uso e ocupação do solo estão direcionadas, predominantemente, para cultivo de soja e milho no planalto, e pecuária na planície.

Dados de sensoriamento remoto

Neste estudo, utilizaram-se imagens do sensor TM ("Thematic Mapper") do satélite Landsat-5 referente à órbita 225/ponto 73, adquiridas em 22 de dezembro de 1992 (período seco) e em 12 de março de 1993 (período chuvoso). As bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, na forma digital, das duas imagens TM foram convertidas de número digital para valores de reflectância aparente e retificadas radiometricamente antes da geração das imagens índice de vegetação e imagens-fração. Além disso, as duas imagens TM foram registradas geometricamente para análise multitemporal, como por exemplo a geração das imagens-diferença.

Conversão de número digital para valores de reflectância aparente

A transformação do número digital (DN) para valores de reflectância aparente foi feita de acordo com Markham & Barker (1986). Em primeiro lugar, os números digitais foram transformados em valores de radiâncias por meio de parâmetros de calibração de pré-lançamento disponíveis no início das fitas compatíveis com o computador (CCT), da seguinte forma:

$$L_{\lambda} = L_{\min_{\lambda}} + ((L_{\max_{\lambda}} - L_{\min_{\lambda}}) * QCAL / QCAL_{\max}) \quad (1)$$

onde:

L_{λ} = radiância espectral;

$L_{\min_{\lambda}}$ = radiância espectral mínima;

$L_{\max_{\lambda}}$ = radiância espectral máxima;

$QCAL_{\max}$ = número digital máximo; e

$QCAL$ = número digital.

A seguir, os valores de radiância espectral (L_{λ}) foram utilizados para cálculo da reflectância aparente do seguinte modo:

$$\rho_p = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{E_{\text{sun}_{\lambda}} * \cos \theta} \quad (2)$$

onde:

ρ_p = reflectância aparente;

L_{λ} = radiância espectral (mW.cm⁻².ster⁻¹.µm⁻¹);

d = distância sol-terra em unidades astronômicas;

$E_{sun\lambda}$ = irradiância espectral média do sol no topo da atmosfera ($mW.cm^{-2}\mu m^{-1}$);

θ = ângulo solar zenital.

Retificação radiométrica

Após a obtenção dos valores de reflectância aparente das seis bandas do TM em cada uma das datas, aplicou-se um método de retificação radiométrica, proposto por Hall et al. (1991), que visa minimizar a influência dos efeitos da geometria de iluminação e da atmosfera, para melhor comparação entre as imagens obtidas em datas diferentes. O método é baseado em dois passos: 1) aquisição de um conjunto de dados de controle, caracterizado pela baixa ou nenhuma variação em suas reflectâncias médias entre as imagens; e 2) determinação empírica dos coeficientes para a transformação linear de todas as imagens em relação aos dados de referência.

O conjunto de dados de controle é composto por pixels pertencentes a áreas não vegetadas do espaço bidimensional de Kauth-Thomas (KT) "greenness-brightness": pixels escuros (dados radiométricos escuros de controle) e pixels claros (dados radiométricos claros de controle). O modelo usado na retificação é dado por um conjunto de transformações lineares, como segue:

$$T_i = m_i * x_i + b_i,$$

onde:

T_i = número digital da imagem retificada;

x_i = número digital da imagem original;

$m_i = (Br_i - Dr_i) / (Bs_i - Ds_i)$;

$b_i = (Dr_i * Bs_i - Ds_i * Br_i) / (Bs_i - Ds_i)$

e onde:

Br_i = média do conjunto de referência clara;

Dr_i = média do conjunto de referência escura;

Bs_i = média do conjunto claro a ser retificado;

Ds_i = média do conjunto escuro a ser retificado; e

i = bandas do TM (1 a 5 e 7).

Imagens índice de vegetação

A baixa reflectância das folhas na região do visível deve-se à absorção da radiação solar pelos pigmentos, enquanto a alta reflectância na região do infravermelho próximo deve-se ao espalhamento (reflectância e transmitância) da radiação no interior das folhas em função da estrutura celular. Portanto, o comportamento espectral das folhas depende da sua composição química e de sua estrutura interna. A variação da reflectância da cobertura vegetal em diferentes bandas de sensores remotos depende, principalmente, da quantidade de folhas e da arquitetura do dossel.

Diversos índices de vegetação têm sido propostos na literatura com o objetivo de explorar a assinatura espectral da vegetação, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo (Rouse et al., 1974; Kauth & Thomas, 1976; Tucker, 1979; Jackson, 1983). Estes índices são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice de área foliar, além de minimizarem os efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição, que influenciam a resposta espectral das bandas dos sensores remotos.

O índice de vegetação (NDVI) mais conhecido e também utilizado neste estudo é o da diferença normalizada (Rouse et al., 1974; Deering et al., 1975). O NDVI é obtido da seguinte forma:

$$NDVI = (IV - VIS) / (IV + VIS),$$

onde:

IV = resposta espectral do pixel na banda do infravermelho próximo (TM 4);

VIS = resposta espectral do pixel na banda do visível (TM 3).

Para a geração das imagens índice de vegetação é importante a transformação dos números digitais em valores de reflectância, de modo a obter valores comparáveis com os de outros trabalhos disponíveis na literatura.

Imagens-fração derivadas de modelo linear de mistura espectral

A relação linear é usada para representar a mistura espectral dos componentes dentro do elemento de resolução do sensor. Assim, a resposta de cada pixel, em qualquer banda espectral, pode ser definida como uma combinação linear das respostas de cada componente, desde que esteja no alvo sensoriado. Desse modo, cada pixel da imagem, que pode assumir qualquer valor dentro da escala de cinza, contém informações sobre a proporção e a resposta espectral de cada componente dentro de cada elemento de resolução.

Portanto, para qualquer imagem multiespectral, como por exemplo a do TM/Landsat, se as respostas espectrais dos componentes são conhecidas, então as proporções dos componentes podem ser estimadas. Do mesmo modo, se as proporções dos componentes são conhecidas, então as respostas espectrais dos componentes podem ser obtidas. Nesse estudo, as respostas espectrais dos componentes foram obtidas diretamente das imagens, sendo portanto conhecidas, e então estimadas as proporções de cada componente dentro dos pixels gerando as imagens-fração correspondentes.

O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = a \cdot \text{vege}_i + b \cdot \text{solo}_i + c \cdot \text{água}_i + e_i$$

onde:

r_i = resposta do pixel na banda i ;

a = proporção de vegetação;

b = proporção de solo;

c = proporção de sombra ou água;

vege_i = resposta espectral do componente vegetação na banda i ;

solo_i = resposta espectral do componente solo na banda i ;

água_i = resposta espectral do componente sombra ou água na banda i ;

e_i = erro na banda i ; e

i = bandas do TM (1 a 5 e 7).

Neste estudo, utilizaram-se todas as bandas do TM, exceto a banda 6 (infravermelho termal), formando um sistema de equações lineares que pode ser resolvido pelo método dos mínimos quadrados (Shimabukuro & Smith, 1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os coeficientes de transformação da retificação radiométrica entre as imagens do período seco (22/12/92) e do período chuvoso (12/03/93), obtidas através do método de retificação descrito anteriormente, considerando a imagem do período seco como referência.

A Tabela 2 mostra os resultados do processo de retificação radiométrica entre as imagens do período seco (imagem referência) e do período chuvoso (imagem retificada). Como pode ser observado na Tabela 2, as diferenças de nível digital médio entre a imagem de referência e a imagem não retificada podem ser atribuídas ao efeito da atmosfera e à diferença de calibração dos detectores entre as datas de aquisição. Após a retificação radiométrica, os valores retificados tornaram-se semelhantes aos valores da imagem de referência, indicando que o método de retificação foi bem sucedido.

TABELA 1. Valores dos coeficientes de transformação da retificação radiométrica entre as imagens obtidas em 22/12/92 e 12/03/93.

Coefficientes de retificação	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
m_i	0,9917	0,9125	1,0536	1,1190	1,3156	1,2865
b_i	5,5544	5,7258	3,3253	-1,7410	-1,7864	-0,2248

TABELA 2. Níveis digitais médios dos pixels utilizados no processo de retificação radiométrica.

Bandas	Nível digital médio dos pixels escuros			Nível digital médio dos pixels claros		
	Imagem referência (12-12-92)	Imagem (12-03-93)	Imagem retificada (12-03-93)	Imagem referência (12-12-92)	Imagem (12-03-93)	Imagem retificada (12-03-93)
TM1	18,77	13,33	18,37	25,80	20,41	25,41
TM2	15,22	10,41	14,56	28,73	25,21	28,17
TM3	12,20	8,42	11,42	36,92	31,88	36,36
TM4	9,20	9,78	8,78	51,69	47,75	51,10
TM5	2,73	3,43	2,50	98,00	75,85	97,49
TM7	0,28	0,39	0,41	70,55	55,01	70,01

Os dados da Tabela 2 foram submetidos ao teste t para testar as seguintes hipóteses:

(a) $mNDEc = -mNDEs$;

(b) $mNDCc = -mNDCs$

onde NDEc e NDCc são os níveis digitais escuro e claro, respectivamente, da imagem do período chuvoso; NDEs e NDCs são os níveis digitais escuro e claro, respectivamente, da imagem do período seco. Todas as hipóteses testadas foram aceitas pela significância de 0,01%, que indicou que os pixels escolhidos para referência pelo método de retificação apresentaram baixas variações entre as datas.

A Fig. 1 mostra as imagens NDVI dos períodos seco e chuvoso e a diferença entre elas. A imagem diferença mostra a mudança da cobertura vegetal ocorrida entre o período de aquisição das imagens, isto é, as áreas claras indicam o aumento da cobertura vegetal do período seco (dezembro de 1992) em relação ao período chuvoso (março de 1993), enquanto as áreas cinza-escuras mostram áreas em que não houve mudanças e áreas onde diminuiu a cobertura vegetal entre as datas de passagem do satélite.

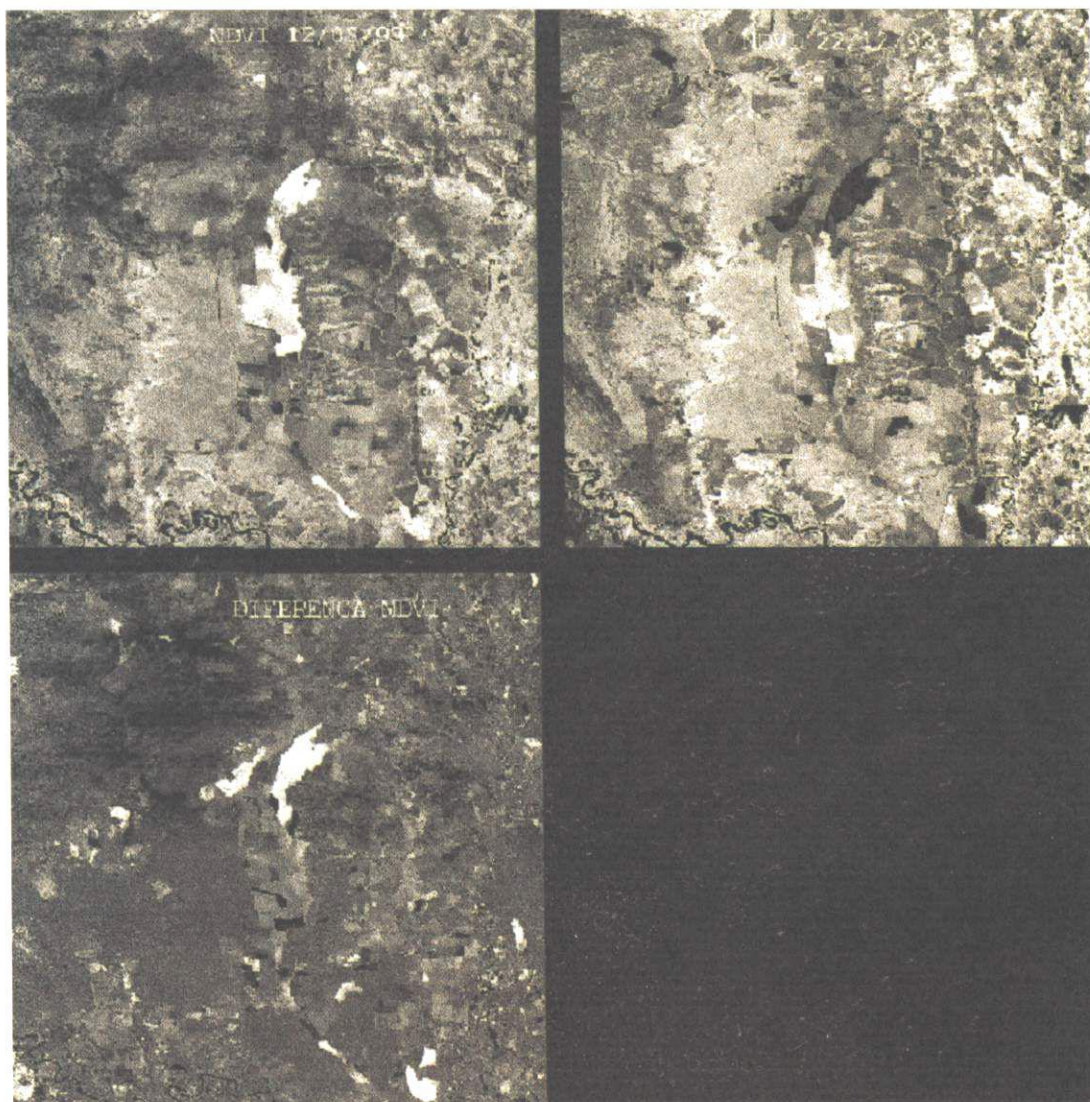


FIG. 1. Imagens NDVI obtidas nos períodos seco e chuvoso e imagem-diferença entre os dois períodos.

A Tabela 3 apresenta os valores de reflectância aparente dos componentes vegetação, solo e sombra ou água utilizados para a geração das imagens-fração correspondentes às duas imagens do TM.

As Figs. 2 e 3 mostram a composição colorida e as imagens-fração de vegetação, solo e sombra ou água derivadas das imagens TM do período seco e chuvoso, respectivamente. As áreas claras nessas imagens indicam a maior proporção dos componentes (vegetação, solo, e sombra ou água) nos pixels. Existe alta correlação entre a imagem fração de vegetação e a imagem índice de vegetação, devido ao fato de que elas realçam a quantidade de vegetação nos pixels. As imagens-fração podem ser utilizadas para a classificação da cobertura do solo, pela análise das

TABELA 3. Valores de reflectância aparente dos componentes vegetação, solo e sombra ou água utilizados para a geração das imagens-fração correspondentes às duas imagens do TM.

Bandas	Vegetação	Solo	Sombra/água
TM 1	0,07	0,13	0,07
TM 2	0,08	0,18	0,06
TM 3	0,04	0,24	0,05
TM 4	0,47	0,27	0,03
TM 5	0,26	0,51	0,00
TM 7	0,09	0,40	0,00

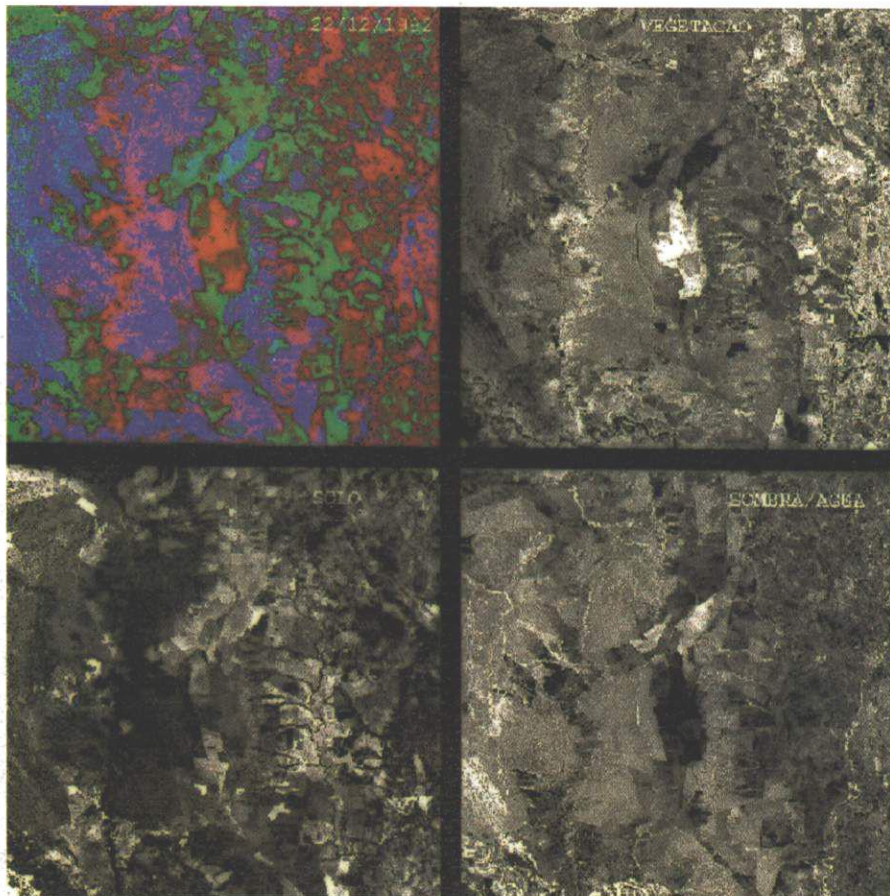


FIG. 2. Composição colorida das imagens-fração de vegetação, solo e sombra do período seco (22/12/1992).

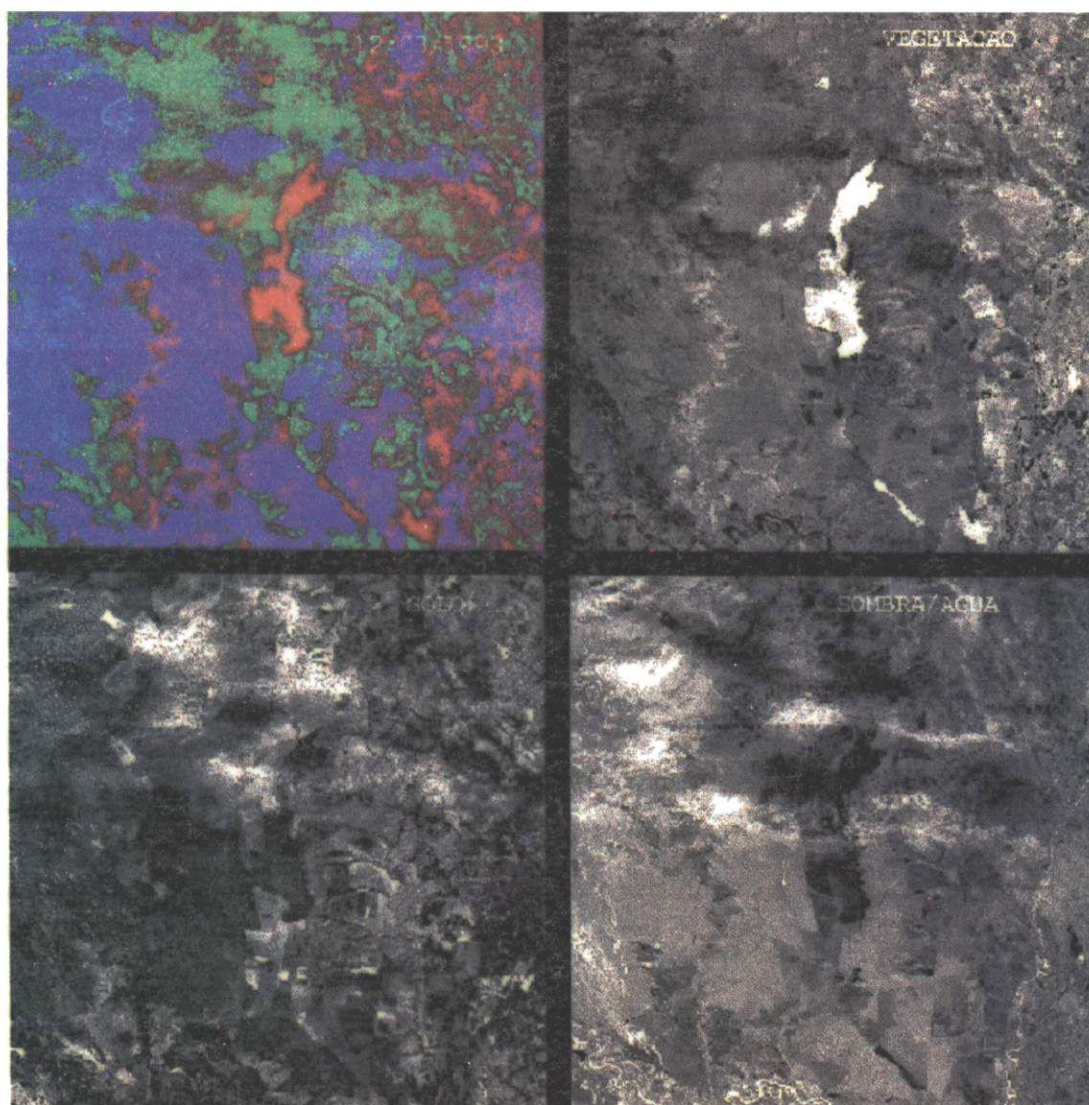


FIG. 3. Composição colorida das imagens-fração de vegetação, solo e sombra do período chuvoso (12/03/1993).

proporções de cada componente nos pixels. Por exemplo, áreas alagadas apresentam alta proporção de sombra ou água e baixa proporção de vegetação e solo; áreas de cultura agrícola apresentam alta proporção de vegetação e baixa proporção de solo e sombra ou água; e áreas de cerrado apresentam média proporção de vegetação e sombra ou água, e baixa proporção de solo.

A Fig. 4 mostra a composição colorida formada pelas imagens-diferença entre os períodos chuvoso e seco dos componentes vegetação, solo e sombra ou água. Estas imagens mostram as mudanças de cobertura do solo ocorridas entre os períodos de aquisição das imagens.

Os dados da Tabela 4 permitem comparar os níveis digitais médios de alvos extraídos da IF

vegetação e da IV do período chuvoso (VEGE1) e do período seco (VEGE2), após a aplicação do processo de retificação. Duas situações foram selecionadas para comparação: 1) aumento da vegetação do período seco para o período chuvoso (AUVEG); e 2) aumento da fração solo do período seco para o período chuvoso (AUSEC).

Pela análise da Tabela 4, pode-se verificar que o nível digital da fração vegetação aumentou cerca de

58% do período seco para o período chuvoso, no caso AUVEG, enquanto a imagem NDVI aumentou cerca de 40% apenas, sugerindo que a imagem fração de vegetação é mais indicada para avaliar a cobertura vegetal do que a imagem NDVI. No caso em que há um aumento da fração solo do período seco para o período chuvoso, a IF vegetação acusou uma redução de 55% no nível digital médio, enquanto a IV apresentou uma redução de apenas 51%, mostrando-

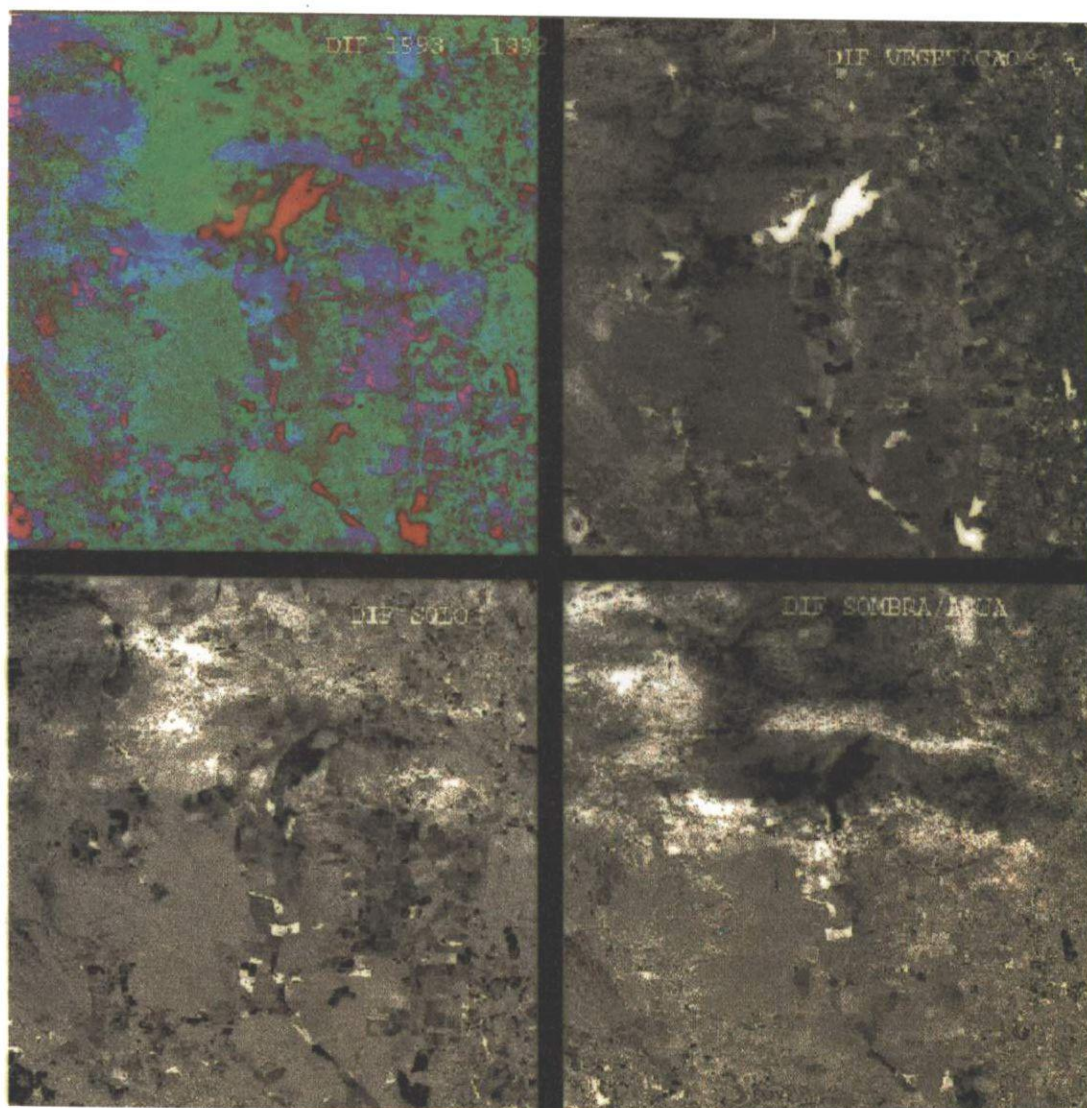


FIG. 4. Composição colorida das imagens-diferença dos componentes vegetação, solo e sombra entre os períodos seco e chuvoso.

TABELA 4. Níveis digitais médios (ND's) da fração vegetação e da imagem NDVI (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada), no período de seca e de cheia (imagens retificada e não-retificada)¹.

Situação	VEGE1	VEGE2	NDVI1	NDVI2
AUVEG	113,21	171,55	153,06	216,76
AUSEC	165,58	110,25	215,13	151,58

¹ VEGE1 = vegetação no período chuvoso; VEGE2 = vegetação no período seco; AUVEG = aumento da vegetação do período seco para o chuvoso; AUSEC = aumento da fração solo do período seco para o chuvoso

-se novamente menos sensível à variação da cobertura vegetal. Estes resultados sugerem que a imagem NDVI é menos sensível que a fração vegetação às mudanças da cobertura vegetal em ambientes complexos como o Pantanal.

Apesar das diferenças na sensibilidade das imagens-fração e das imagens índice de vegetação, a determinação da correlação entre NDVI e fração de vegetação mostrou que são variáveis altamente correlacionadas, tanto no período chuvoso ($r = 0,945$) quanto no período seco ($r = 0,856$).

CONCLUSÕES

1. As imagens-fração e de índice de vegetação permitem o monitoramento da cobertura de solo da região do Pantanal; as imagens-diferença do índice de vegetação e dos componentes vegetação, solo e sombra ou água mostram as mudanças ocorridas na área durante o período de aquisição das imagens estudadas.

2. A imagem-fração de vegetação é mais sensível do que a imagem índice de vegetação às mudanças ocorridas nos alvos das imagens estudadas; as imagens-fração de solo e sombra ou água complementam as informações da imagem-fração de vegetação no estudo do Pantanal.

3. O método de retificação radiométrica apresenta um bom desempenho, desde que os alvos escuros e os alvos claros selecionados nas imagens não tenham sofrido mudanças no intervalo de aquisição das imagens utilizadas.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores Forrest Hall e Jaime Nickeson da NASA/GSFC pela cessão do programa de retificação radiométrica e também pela discussão técnica do método; ao pesquisador Bernardo Rudorff do INPE e ao revisor anônimo pelas sugestões apresentadas na revisão do manuscrito. Yosio E. Shimabukuro e Evelyn M. Novo agradecem ao CNPq pela bolsa de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto Radambrasil. Folha SE.21 Corumbá e parte da folha SE.20. Rio de Janeiro, 1982. 452p. (Levantamento de Recursos Naturais, 27).
- DEERING, D.W.; ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 10., Ann Arbor. *Proceedings...* Ann Arbor, MI: ERIM, 1975. v.2, p.1169-1178.
- HALL, F.G.; STREBEL, D.E.; NICKESON, J.E.; GOETZ, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, v.35, p.11-27, 1991.
- JACKSON, R.D. Spectral indices in n-space. *Remote Sensing of Environment*, v.13, p.409-421, 1983.
- KAUTH, R.J.; THOMAS, G.S. The tasseled-cap: a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMPOSIUM, 2., 1976, West Lafayette, IN. *Proceedings...*, West Lafayette, IN: Purdue University, 1976. p.4B41-4B51.
- MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. Lanham, MD: EOSAT, 1986. (Landsat User Notes).
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 1974. 37p. Type III, Final Report.
- 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, 1991.
- TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v.8, p.127-150, 1979.