

DETECÇÃO DA DINÂMICA DA FLORESTA DE BAMBU NO SUDESTE DO ACRE COM O USO DE TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE

FERNANDO DEL BON ESPÍRITO-SANTO¹
BRENNER STEFAN GOMES SILVA¹
YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO¹

¹INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fernando, breenner, yosio}@ltid.inpe.br

Abstract. The objective of this paper is to show the structural alterations which occurred in the forest, in a portion of the Acre State, due to bamboo forests undergoing synchronous mortality and regrowth. Two Thematic Mapper (TM) images acquired in 1991 and 2001 were utilized in this work. Geometric and radiometric rectification were performed before to do the image analysis. First, the 1991 TM image was geometrically corrected using topographic charts. Then, the 2001 TM image was geometrically registered to the 1991 TM image. In order to analyze multitemporal images, the radiometric rectification of these images was performed considering 2001 TM image as the reference data. The digital number (DN) was converted to apparent reflectance values before to transform the data to Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and fraction images derived from Linear Mixing Models. The NDVI and fraction images showed the mortality condition in the 1991 TM data and the regrowth in the 2001 TM data. The analysis of the combined transformed (NDVI and fraction images) allowed to characterize spatially the land use change occurred during the 10 years period defined by these two TM scenes analyzed.

Keywords: remote sensing, image processing, bamboo forest, Western Amazônia.

1. Introdução

A população de bambu domina grandes porções de florestas tropicais, principalmente na Amazônia Ocidental. Prance (citado por Nelson, 1994) observou cerca de 121.000 km² de florestas dominadas por essa tipologia, em 15 imagens Landsat TM (“Thematic Mapper”), entre 7° a 11° de latitude sul e 66° a 74° de longitude oeste (**Figura 1**). Dessa área, 92.000 km² estão localizadas no Estado do Acre, representando 76% da área total.

Dado ao seu rápido crescimento vegetativo e intensa produção de biomassa, esses bambus interferem significativamente no estabelecimento dos indivíduos arbóreo dentro da floresta (Veblen, 1982). Somado a isso, um outro fato intrigante, é a ocorrência da morte sincronizada de populações inteiras de bambus em um curto intervalo de tempo, geralmente, em ciclos médios de 30 anos (Nelson, 1994). A **Figura 2** ilustra as fases de senescência e crescimento vegetal dos bambus dentro das florestas dominadas por esta cobertura vegetal.

Essa sazonalidade temporal dos bambus altera: (1) a composição florística e estrutural da floresta; (2) os processos naturais de decomposição e ciclagem de nutrientes Filgueiras (1988); e (3) com a intensa exposição ao sol na sua biomassa morta, esses bambus podem funcionar como combustíveis em queimadas (Nelson e Irmão, 1998).

O presente trabalho tem como objetivo detectar e caracterizar a mudança na cobertura vegetal da floresta de bambu numa área da porção sudeste do Acre, em um período de morte e crescimento vegetativo da floresta de bambu. Para isso, serão utilizadas técnicas de processamento de imagens para geração das imagens de índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e imagens fração vegetação, solo e sombra do modelo linear de mistura espectral (MLME).

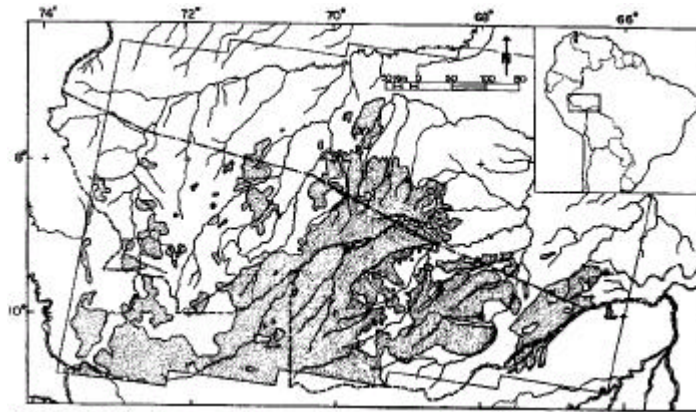


Figura 1 - Distribuição da floresta de bambu dentro de 15 cenas TM no sudoeste Amazônico. FONTE: Nelson (1994, p. 114).

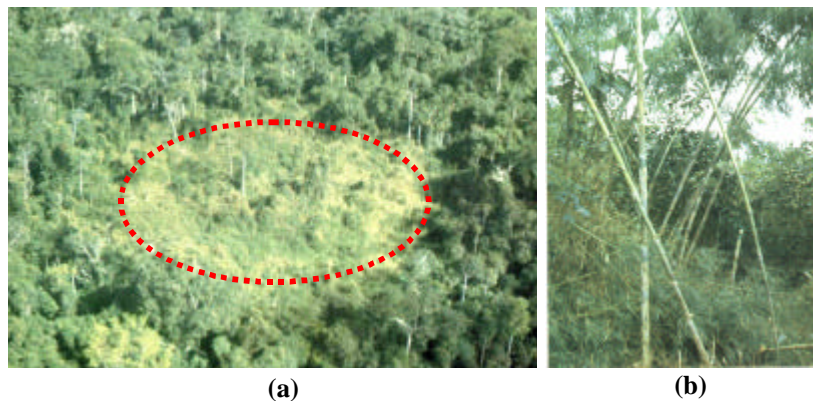


Figura 2 - Comunidade de bambu em estágio de senescência vegetal (perda de folhas e amarelecimento), com conseqüente mortalidade (a) e em estágio vegetativo normal (b). FONTE: RADAMBRASIL (1976).

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Sena Madureira, no Estado do Acre, contida na folha SC.19-Y-B-II, denominada Seringal Icuriã, abrangendo uma superfície de aproximadamente 3.030 km². Está compreendida entre as coordenadas geográficas de 10° 00' 00" e 10° 30' 00" de latitude Sul e 69° 00' 00" e 70° 00' 00" de longitude Oeste (**Figura 3**).

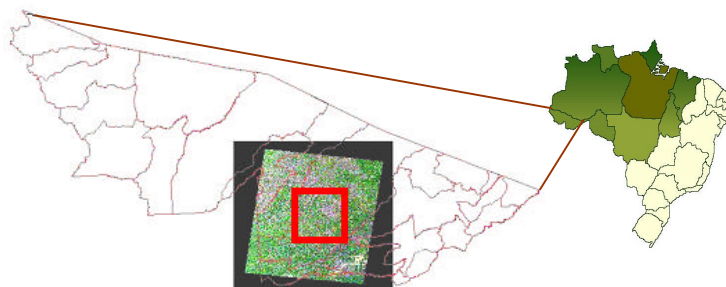


Figura 3 - Localização da área de estudo (em vermelho) dentro de uma imagem TM no Acre.

A região de estudo está localizada dentro de uma zona de transição fitogeográfica de floresta aberta com dominância de bambu (taboca) e floresta ombrófila densa (RADAMBRASIL, 1976).

2.3. Dados de sensoriamento remoto

Nesse estudo, foram utilizadas as imagens TM do satélite Landsat-5 referente à órbita 003/ponto 67, adquiridas em 26 de julho de 1991 (coincidente com o período de mortalidade dos bambus) e em 3 de junho de 2001 (coincidente com o período normal de crescimento dos bambus). Na **Figura 4** são apresentadas as imagens multitemporais do período de análise. 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 NDVI e imagens fração. Primeiramente, a imagem TM de 1991 foi corrigida geometricamente com o uso de cartas topográficas da DSG (1982), folhas SC.19-V-D e SC.19-Y-B-II. Após esse processo, a imagem de 2001 foi registrada geometricamente utilizando a imagem de 1991 como referência.

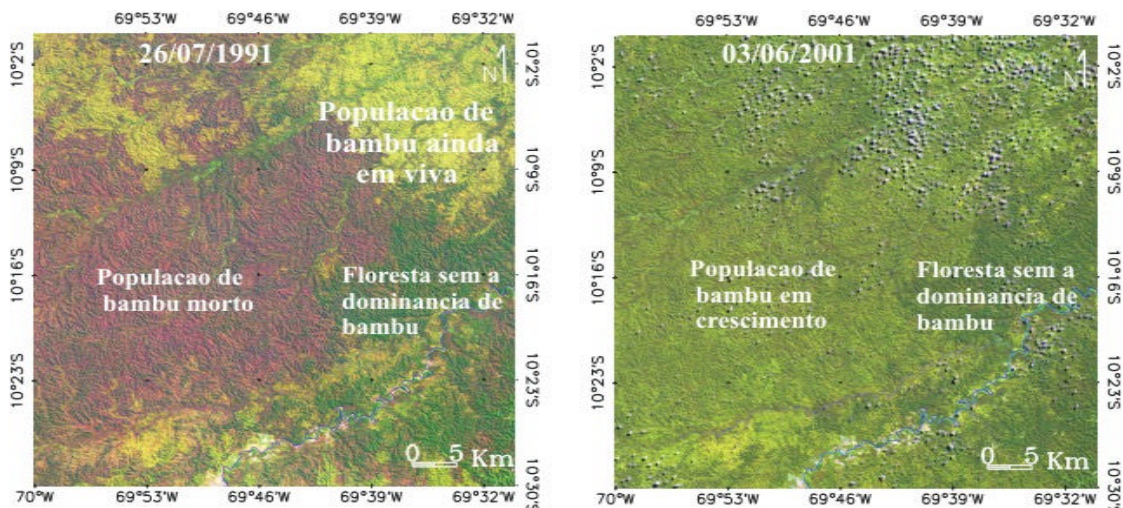


Figura 4 - Imagens TM obtidas em 1991 e 2001, da área de estudo, na composição colorida RGB (543).

2.4. Conversão de número digital para valores de reflectância aparente

A transformação do número digital para valores de reflectância aparente foi realizada através do método de Markham e Barker (1986). Estes autores levaram em consideração os parâmetros de pós-calibração do sensor como a radiância mínima ($L_{min\lambda}$) e radiância máxima ($L_{max\lambda}$) tabelados, valor do ângulo zenital solar (θ_s) e distância Terra - Sol (d). A formulação matemática, para a conversão do número digital (ND) para radiância (L) e reflectância (ρ), é descrita abaixo:

a) Conversão de valores de ND para valores de radiância:

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

onde: L_{λ} = radiância espectral, em $mW.cm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; $L_{min\lambda}$ = radiância espectral correspondente ao $Qcal = 0$ (nível digital mínimo), em $mW.cm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; $L_{max\lambda}$ = radiância espectral correspondente ao $Qcal = 255$ (nível digital máximo) (radiância de

saturação), em $\text{mW.cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$; QCAL = radiância calibrada e rescalonada para o intervalo 0 a 255, em unidades de número digital; $\text{QCAL}_{\text{max}\lambda}$ = amplitude de variação dos níveis digitais.

b) Conversão de valores de radiância para valores de reflectância aparente:

$$\rho_{\lambda} = (\pi L_{\lambda} d^2) / (E_{\text{sun}\lambda} \cos \theta_s) \quad (2)$$

onde: ρ_{λ} = reflectância aparente, medida ao nível do satélite, adimensional; L_{λ} = radiância espectral no detector, em $\text{mW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$; d = distância Terra-Sol, em unidades astronômicas; $E_{\text{sun}\lambda}$ = irradiância espectral média no topo da atmosfera, em $\text{mW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$; θ_s = ângulo zenital solar, em graus.

2.5. Retificação radiométrica

Após a conversão dos números digitais para valores de reflectância aparente das seis bandas das imagens TM utilizadas, foi feita a retificação radiométrica, através do método proposto por Hall et al. (1991), com a finalidade de minimizar o efeito da geometria de iluminação e da atmosfera, entre as duas datas. Segundo os autores, o método se baseia na obtenção de dados de controle, composto por pixels escuros (dados radiométricos escuros) e pixels claros (dados radiométricos claros). O método é composto pelos seguintes passos: 1) aquisição de um conjunto de dados de controle, caracterizado pela baixa ou nenhuma variação durante o período de aquisição das imagens; e 2) determinação empírica dos coeficientes para a transformação linear de todas as imagens em relação a imagem de referência. A retificação radiométrica é realizada então por:

$$T_i = m_i \cdot x_i + b_i \quad (3)$$

onde: T_i = valor de reflectância da imagem retificada; x_i = valor de reflectância da imagem original;

$$m_i = (Br_i - Dr_i) / (Bs_i - Ds_i) \quad (4)$$

$$b_i = (Dr_i \cdot Bs_i - Ds_i \cdot Br_i) / (Bs_i - Ds_i) \quad (5)$$

onde: Dr_i = média de reflectância do grupo de controle escuro da imagem referência; Br_i = média de reflectância do grupo de controle claro da imagem referência; Ds_i = média de reflectância do grupo escuro da imagem a ser retificada; Bs_i = média de reflectância do grupo claro da imagem a ser retificada; e i = bandas do TM (1 a 5 e 7).

Na **Figura 5** é apresentado o esquema do processo de retificação radiométrica utilizado neste trabalho.

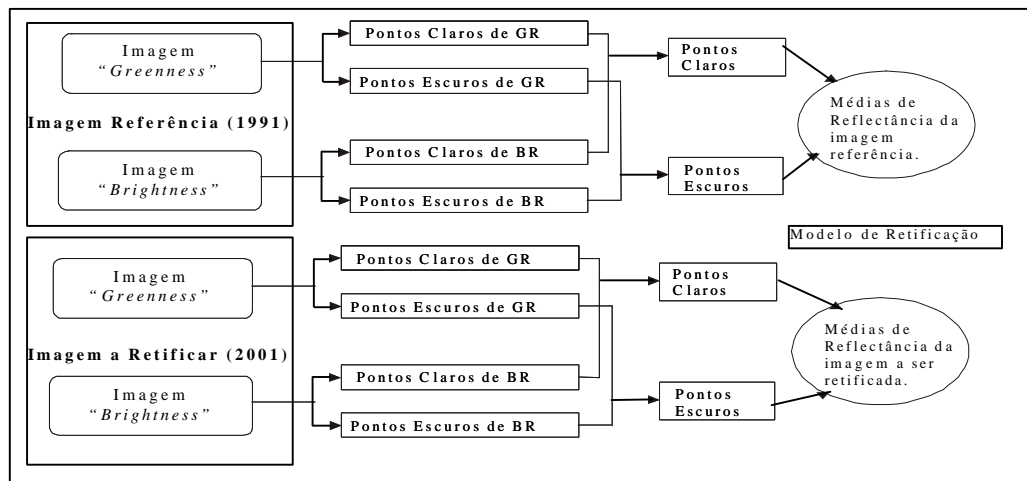


Figura 5 - Esquema do processo de retificação radiométrica adotado neste estudo.
 FONTE: Adaptado de Lorena (2001, p. 35).

2.6. Imagens índice de vegetação

Índices de vegetação são combinações de dados de dois ou mais intervalos espectrais com a finalidade de realçar as áreas com cobertura vegetal. Por isso, esses índices são muito utilizados para a determinação de biomassa ou do estado fisiológico da vegetação (Tucker, 1979). O índice de vegetação mais conhecido, utilizado neste trabalho, é o da diferença normalizada (NDVI) de Rouse et al. (1973), obtido da seguinte forma:

$$NDVI = (IV - VIS) / (IV + VIS) \quad (6)$$

onde: IV = valor de reflectância na banda do infravermelho próximo (TM 4); VIS = valor de reflectância na banda do visível (TM 3).

2.7. Modelo linear de mistura espectral

Os modelos lineares de misturas espectrais são excelentes ferramentas para a extração de informações a nível de subpixel. Neste processo cada porção do espaço é subdividido em componentes espectrais ou endmembers (Gilabert et al., 2000). Esses modelos tem sido aplicados em vários estudos, como em geologia (Adams et al., 1986), em floresta (Shimabukuro, 1987) e limnologia (Novo e Shimabukuro, 1994).

Segundo Shimabukuro e Smith (1991), o modelo linear de mistura espectral (MLME) é indicado para o estudo de vegetação. A sombra pode ser considerada como uma das componentes contidas em qualquer imagem de sensoriamento remoto. Como a resposta espectral de uma floresta é caracterizada pela quantidade de sombra, esta variável poderia ser utilizada em trabalhos de estratificação do dossel florestal. As imagens fração sombra podem inferir sobre a estrutura da vegetação, podendo assim ser correlacionada com vários parâmetros ecológicos, como por exemplo o estágio de crescimento (Shimabukuro e Smith, 1995) e a variação temporal da biomassa vegetal (Shimabukuro et al., 1998). O modelo linear de mistura espectral pode ser escrito da seguinte forma:

$$r_i = a * vege_i + b * solo_i + c * água_i + e_i \quad (7)$$

onde: r_i é a resposta espectral do pixel na banda i ; a é a proporção de vegetação; b é a proporção de solo; c é a proporção de sombra ou água; $vege_i$ é a resposta espectral da componente vegetação na banda i ; $solo_i$ é resposta espectral do componente solo na banda i ;

\hat{a}_{i} é resposta espectral do componente sombra ou água na banda i ; e é o erro na banda i ; e i são as bandas dos sensores.

Neste trabalho, também foi aplicado o MLME para as duas datas, a fim de se determinar ou identificar as mudanças ocorridas no período das imagens analisadas neste trabalho. Foram utilizadas todas as bandas do TM, exceto a banda 6 (infravermelho termal).

3. Resultados e Discussão

Na tabela 1 são apresentados os coeficientes de transformação da retificação radiométrica entre as imagens do período da mortalidade generalizada dos bambus (26/07/1991) e imagem do período de crescimento normal dos bambus (03/06/2001), obtidos através do método de retificação descrito anteriormente, considerando a imagem de 2001 como referência.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de transformação da retificação radiométrica entre as imagens obtidas em 26/07/1991 e 03/06/2001.

Coeficientes de retificação	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
m_1	3,1871	1,5971	1,0569	1,0545	1,1240	0,7270
b_1	-48,5245	-11,4862	-2,3896	-4,7364	-0,4787	0,0010

A **Figura 6** ilustra as imagens NDVI dos períodos de mortalidade e crescimento da população de bambus dentro da floresta e a diferença entre os dois períodos de análise. Na imagem diferença de NDVI (1991 - 2001), é possível notar a mudança da cobertura vegetal ocorrida entre os períodos de aquisições das imagens. As áreas mais escuras indicam o aumento da cobertura vegetal e conseqüente ocorrência de mudanças no dossel florestal, ou seja, a passagem da condição de mortalidade em 1991 para o estágio vegetativo normal em 2001.

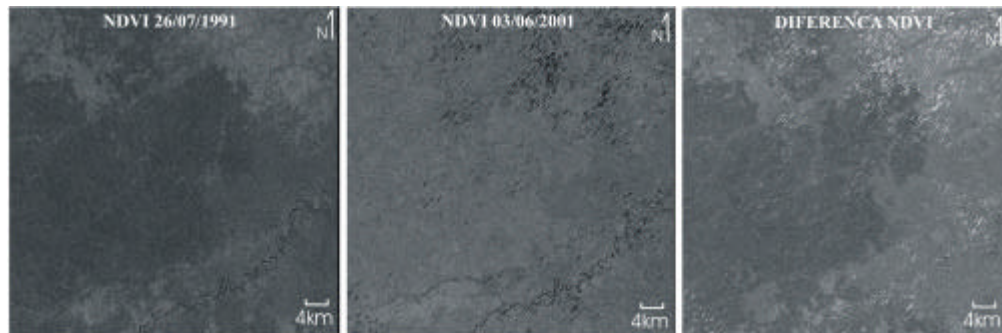


Figura 6 - Imagens NDVI obtidas nos períodos de mortalidade e crescimento dos bambus e imagem-diferença (1991 - 2001).

As **Figuras 7 e 8** mostram a composição colorida e as imagens-fração de sombra, vegetação e solo, derivadas da imagem TM do período de mortalidade e crescimento da população de bambu. As áreas claras nessas imagens indicam a maior proporção de cada componente do modelo (sombra, solo e vegetação).

Existe uma alta correlação entre a imagem fração vegetação e imagens derivadas dos índices de vegetação NDVI. No entanto, as imagens fração vegetação do MLME conseguiu separar com mais nitidez as áreas com a ocorrência de bambu na fase de mortalidade (**Figura 7**) e de crescimento (**Figura 8**), quando comparado às imagens NDVI de 1991 e 2001 (**Figura 6**), respectivamente. Além disso, as imagens fração podem ser utilizadas para classificação da cobertura do solo, separadamente, pela análise das proporções de cada componente nos pixels (Shimabukuro et al., 1998).

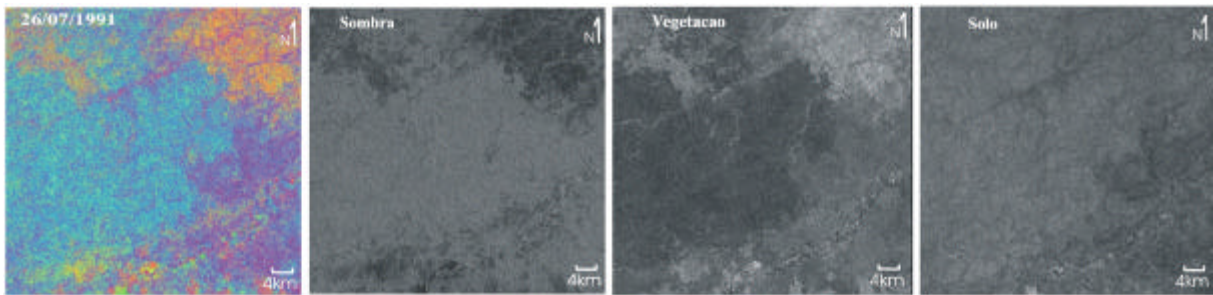


Figura 7 - Composição colorida e as imagens fração sombra, vegetação e solo do período de mortalidade da comunidade de bambu (1991).

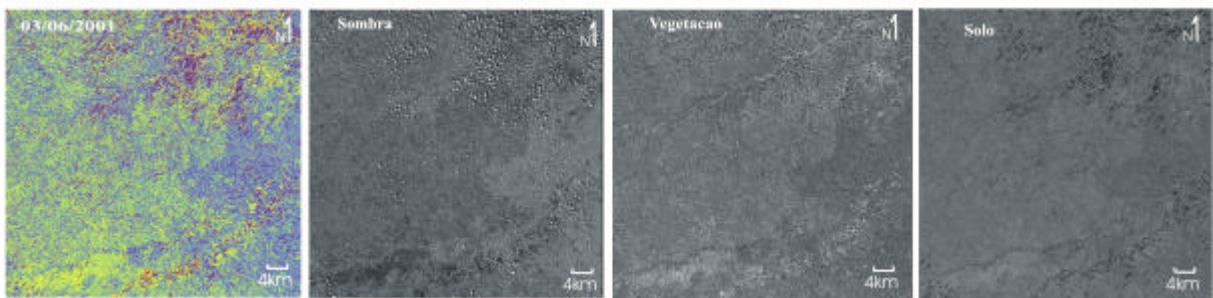


Figura 8 - Composição colorida e as imagens fração sombra, vegetação e solo do período de fase de crescimento vegetativo de comunidade de bambu (2001).

A **Figura 9** mostra a composição colorida formada pelas imagens diferença entre as imagens (1991 - 2001) dos componentes sombra, vegetação e solo. Estas imagens mostram as mudanças de cobertura do solo ocorridas entre os períodos de aquisição das imagens. Percebe-se, visualmente, que estas imagens diferença das componentes vegetação e sombra retratam melhor a mudança da estrutura da vegetação nas duas datas, quando comparada à imagem diferença de NDVI.

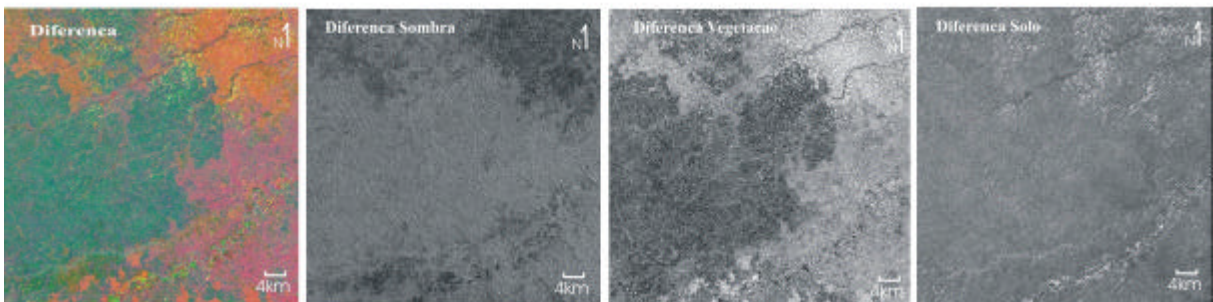


Figura 9 - Composição colorida e as imagens diferença dos componentes sombra, vegetação e solo do período de mortalidade e de crescimento vegetativo da população de bambu.

4. Conclusões

As datas de aquisição das imagens de SR e a metodologia adotada para mostrar o sincronismo vegetal da floresta dominada por bambu foram eficientes para tal finalidade. Além disso, foi verificado que: (1) o método de retificação radiométrica de Hall et al. (1991) apresentou um bom resultado, indicando que esta técnica deve ser empregado em estudos multitemporais; (2) as imagens fração vegetação, solo e sombra derivada do MLME e a imagem índice de vegetação (NDVI), permitiram caracterizar a mudança ocorrida na estrutura da floresta no Estado do Acre, nos períodos de mortalidade (1991) e fase vegetativa (2001) da população de bambu, apesar de se perceber visualmente que as imagens fração sombra e vegetação do MLME foram mais sensíveis a estas mudanças da estrutura da vegetação; e (3) as imagens

diferença de NDVI e do MLME (imagens fração) permitiram caracterizar espacialmente a mudança de ocupação do solo no período de dez anos, e que as imagens-diferença do MLME, também foram mais sensíveis a estas mudanças estruturais da floresta.

A inclusão de uma imagem adicional adquirida na data anterior a imagem de 1991 ajudará a entender melhor a dinâmica das florestas dominadas por bambu. A análise dessa nova imagem está sendo realizada na seqüência desta pesquisa.

5. Referências

Adams, J.B.; Smith, M.O.; Johnson, P.E. Spectral Mixture Modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 Site. *Journal of Geophysical Research*, v. 91, n B8, p. 8098-8112, July 1986.

Gilabert, M.A.; Garcia Haro, F.J.; Media, J.A mixture modeling approach to estimate vegetation parameters for heterogeneous canopies in remote sensing. *Remote Sensing of Enviroment*, v. 72, n. 3 , p. 328-345, June 2000.

Filgueiras, T.S. A floração dos bambus e seu impacto ecológico. *Eugenia*, Nova Friburgo, v. 15, p. 1-8, 1988.

Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multidade, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*. v.35, n.1, p.11-27, Jan. 1991.

Lorena, R.B. *Espacialização da dinâmica do uso da terra em porção da Amazônia Ocidental (Acre), através de técnicas de detecção de mudanças*. São José dos Campos. 92p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

Markham, B.L.; Barker, J.L. *Landsat MSS and TM postcalibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures*. Lanham: EOSAT, 1986. 21 p. (Landsat Technical notes n.1).

Nelson, B.W.; Irmão, M.N. Fire penetration in standing Amazon forests. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos, Set. 2001. Anais. São José dos Campos: INPE, 2001. Sessão Oral. 12p. Repositório da URLib: <sid.inpe.br/deise/1999/02.09.09.43>. Disponível em: <<http://iris.sid.inpe.br:1908/rep/dpi.inpe.br/deise/1999/02.09.09.43>>. Acesso em: 7 de novembro de 2002.

Nelson, B.W. Natural Forest disturbance and change in the Brazilian Amazon, *Remote Sensing Reviews*, v.10, p. 105 -125, Oct. 1994.

Novo, E. M.; Shimabukuro, Y. E.; Spectral mixture analysis of inland tropical waters, *International Journal of Remote Sensing*, v. 15 , n. 6, p. 1352-1354, April 1994.

RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. *Folha SC.19 - Rio Branco*. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. vol.12. Rio de Janeiro: DNPM, 1976. 510p.

Shimabukuro, Y.E. *Shade images derived from linear mixing models of multispectral measurements of forested areas* (Doctor of Phylosophy Thesis) - Colorado State University, Fort Collins, CO, 1987.

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.; Smith, J.A. Fraction images derived from Landsat TM and MSS data for monitoring reforested areas. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 21, n. 1, p. 67-74, March, 1995.

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, número especial, p. 1729-1737, out. 1998.

Veblen, T.T. Growth patherns of Chusquea bamboos in the understory of Chilean Nothofagus forests and their influences in forest dynamics. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, Oxford, v. 109, n.4, p.474-487, 1982.