

USO DO MODELO LINEAR DE MISTURA ESPECTRAL PARA O MAPEAMENTO SISTEMÁTICO E OPERACIONAL DO BIOMA CERRADO: POSSIBILIDADES, IMPLICAÇÕES E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Manuel Eduardo Ferreira¹
Laerte Guimarães Ferreira²
Edson Eijy Sano³
Yosio Edemir Shimabukuro⁴

¹Universidade de Brasília
Instituto de Geociências - Departamento de Geologia Geral e Aplicada
Campus Universitário Darcy Ribeiro – 70919-970 – Brasília - DF, Brasil
manfer@unb.br

²Universidade Federal de Goiás
Instituto de Estudos Sócio-Ambientais (IESA)
Campus Samambaia, Caixa Postal 131 – 74001-970 – Goiânia - GO, Brasil
laerte@iesa.ufg.br

³Embrapa Cerrados
BR-020 Km 18, Caixa Postal 08.223 – 73301-970 – Planaltina - DF, Brasil
sano@cpac.embrapa.br

⁴INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 – 12201-970 – São José dos Campos - SP, Brasil
yosio@ltid.inpe.br

Abstract. The Cerrado biome, one of the largest and richest savanna environments in the world, is also an endangered ecosystem due to the severe land conversion. Therefore, it becomes mandatory a systematic and operational monitoring of the vegetation cover. Within this scope, in this study we evaluated the use of a linear spectral mixture model for mapping the Cerrado physiognomies. The model was applied to a dry season (July 2001) Landsat 7 ETM+ scene (221/71) converted to reflectance values, for an area corresponding to the Brasília National Park. Three endmembers were acquired directly from the image (vegetation, soil, and shadow) and the respective derived images were capable of discriminating the major Cerrado domains (herbaceous, arbustive, and arborescent), with proportions ranging from 0.7 to 1.0. Currently, we are evaluating a different set of endmembers and the use of segmentation techniques as an attempt to more precisely map the Cerrado physiognomies. In addition, the impact of atmospheric contamination on the model output is being assessed as well.

Keywords: linear mixture modeling, vegetation mapping, Cerrado.

1. Introdução

O bioma Cerrado, constituído por um complexo vegetacional presente em mais de dez Estados brasileiros, exibe uma das floras mais ricas dentre os ambientes savânicos no mundo. A manutenção desta biodiversidade é favorecida pela presença das três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Tocantins, São Francisco e Prata), além de uma grande diversidade de solos, geologia, e queimadas naturais (Eiten, 1972). Apesar disto, este ecossistema é pouco valorizado em termos de conservação, apresentando apenas 1% de sua área assegurada na forma de parques ou reservas.

Em função da contínua abertura de novas áreas para pastagem e agricultura, estima-se que, até o momento, aproximadamente 40% deste bioma tenham sido desmatados (Sano et al., 2002), de um total de 208 milhões de hectares. Há, portanto, uma real necessidade de se estabelecer o monitoramento sistemático da vegetação, através do uso operacional e efetivo dos diversos produtos de sensoriamento remoto atualmente disponíveis.

Por outro lado, estudos recentes sobre mapeamento do Cerrado, utilizando dados de sensoriamento remoto de última geração, têm demonstrado algumas restrições quanto à discriminação de fitofisionomias deste bioma (Ferreira et al., 2002). Em geral, observa-se uma certa confusão espectral entre classes gramíneo-lenhosas (Campo Limpo e Campo Sujo) e arbustivas (Campo Cerrado e Cerrado *sensu stricto*).

Neste sentido, o presente estudo busca avaliar a aplicação de um Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para o mapeamento das fisionomias de Cerrado. Objetivos específicos incluem (1) a definição de um conjunto apropriado de componentes puros (*endmembers*) para modelar as misturas espectrais existentes no bioma Cerrado, (2) a avaliação do uso de *endmembers* intrínsecos à imagem, bem como aqueles definidos a partir de dados espectroradiométricos obtidos em campo e (3) a avaliação dos efeitos da contaminação atmosférica na aplicação dos modelos de mistura.

2. Modelo Linear de Mistura Espectral

Imagens de sensoriamento remoto normalmente apresentam, na maior parte das vezes, *pixels* misturados, devido à variação e proximidade dos alvos na superfície. Em geral, esta mistura espectral ocorre devido ao campo de visada instantâneo do sensor (GIFOV) incluir mais de uma classe de cobertura, havendo assim uma combinação da radiância dos diversos materiais observados pelo sensor (Verhoeve & De Wulf, 2002). Também contribuem à mistura no sinal, principalmente entre *pixels*, fatores espúrios à obtenção das imagens, em particular aqueles devido à contaminação atmosférica e variações na geometria de aquisição.

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) possui como objetivos básicos (1) reduzir o volume de dados a serem utilizados em um processamento (e.g. classificação de imagens) e (2) realçar os alvos de interesse. Este modelo fundamenta-se no pressuposto de que a resposta espectral de um *pixel*, numa imagem qualquer (bandas 1, 2, ..., *m*), seria uma combinação linear dos espectros de diversos materiais contidos na superfície. Nestas condições, para qualquer imagem (multiespectral ou hiperespectral) e sendo as respostas espectrais dos componentes conhecidas, as proporções destes podem ser estimadas, de forma individual, por meio da geração de imagens-fração (Shimabukuro & Smith, 1995; Shimabukuro et al., 1998).

A imagem-fração, para um respectivo *endmember*, pode ser obtida através da aplicação do modelo de mistura apresentado na Equação 1. A Equação 2 refere-se ao termo de erro da primeira equação, correspondendo aos valores residuais presentes em cada *pixel*, não solucionados pelo método de análise proposto.

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_{ij}) + e_i \quad (1)$$

$$e_i = r_i - \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j) \quad (2)$$

Onde: r_i = reflectância espectral observada na banda i de um *pixel*, contendo um ou mais componentes; a_{ij} = reflectância espectral do componente j para a banda espectral i ; x_j = proporção do componente j (*endmember*) dentro de um *pixel*; e_i = erro para a banda i (contribuição residual não considerada pelo conjunto de *endmembers*); $j = 1, 2, 3, \dots, n$ (número de componentes); $i = 1, 2, 3, \dots, m$ (número de bandas espectrais).

O MLME deve seguir as restrições apresentadas na Equação 3, as quais orientam a análise das proporções de cada componente amostrado na imagem. As imagens-fração podem ser estimadas por diferentes métodos, dentre estes, os mais conhecidos são o CLS (*Constrained Least Square*) e o WLS (*Weighted Least Square*), ambos voltados para minimizar a soma dos quadrados dos erros (ou valores residuais) em cada *pixel*. Uma descrição detalhada destes e de outros métodos pode ser encontrada em Holben & Shimabukuro (1993).

$$0 \leq x_j \leq 1 \text{ e } \sum x_j = 1 \quad (3)$$

2. Desenho Experimental

Área de estudo

O MLME foi avaliado em uma cena Landsat 7 ETM⁺ (221/71), obtida em 20 de julho de 2001, especificamente para a área correspondente ao Parque Nacional de Brasília (PNB), localizado ao norte do Distrito Federal, entre a latitude sul 15° 35' / 15° 45' e longitude oeste 47° 53' / 48° 05'. Trata-se de uma área relativamente extensa e preservada, com aproximadamente 30.000 hectares, bastante representativa das principais fitofisionomias de Cerrado (Campo Limpo, Campo Sujo, Campo Cerrado e Cerrado *sensu stricto*) (**Figura 1**).

Abordagem Metodológica

- Atualização do mapa de cobertura vegetal do Parque Nacional de Brasília, por meio de levantamentos de campo e uso de dados orbitais: ETM⁺ 15m (Red, NIR, SWIR + Pan) / IKONOS 1m e 4m (Blue, Red, NIR) (**Figura 1**). O atual mapa está sendo utilizado como verdade de campo a fim de se avaliar e validar o modelo de mistura quanto à discriminação das fisionomias predominantes na área de estudo.
- Aplicação do MLME com os componentes *vegetação*, *solo* e *sombra*, haja a vista a possibilidade de se mapear os vários tipos de cobertura presentes na área de estudo a partir de três *endmembers*, conforme demonstrado na **Figura 2**.

Aplicação do MLME nos dados Landsat 7 ETM⁺

O MLME foi aplicado na imagem Landsat ETM+ (bandas 1 - 5 e 7), convertida para nível de reflectância, direcionando-se a análise para o Parque Nacional de Brasília. Amostras dos

componentes *vegetação*, *solo* e *sombra* (consideradas como puras) foram extraídas diretamente da imagem (221/71). Para tanto, realizou-se uma seleção prévia dos *endmembers* com base na distribuição dos *pixels* no espaço amostral vermelho - infravermelho, e considerando a teoria do *simplex* (Bajjouk et al., 1998), onde os *pixels* mais puros encontram-se nos extremos desta distribuição.

O componente *vegetação* foi amostrado em áreas com Mata de Galeria, por ser esta classe a de maior vigor vegetacional no bioma Cerrado. Amostras do componente *sombra* foram obtidas na área correspondente na imagem à represa Santa Maria. Na Figura 2 observam-se as etapas de definição das amostras, consideradas como *pixels* puros, para os três componentes.

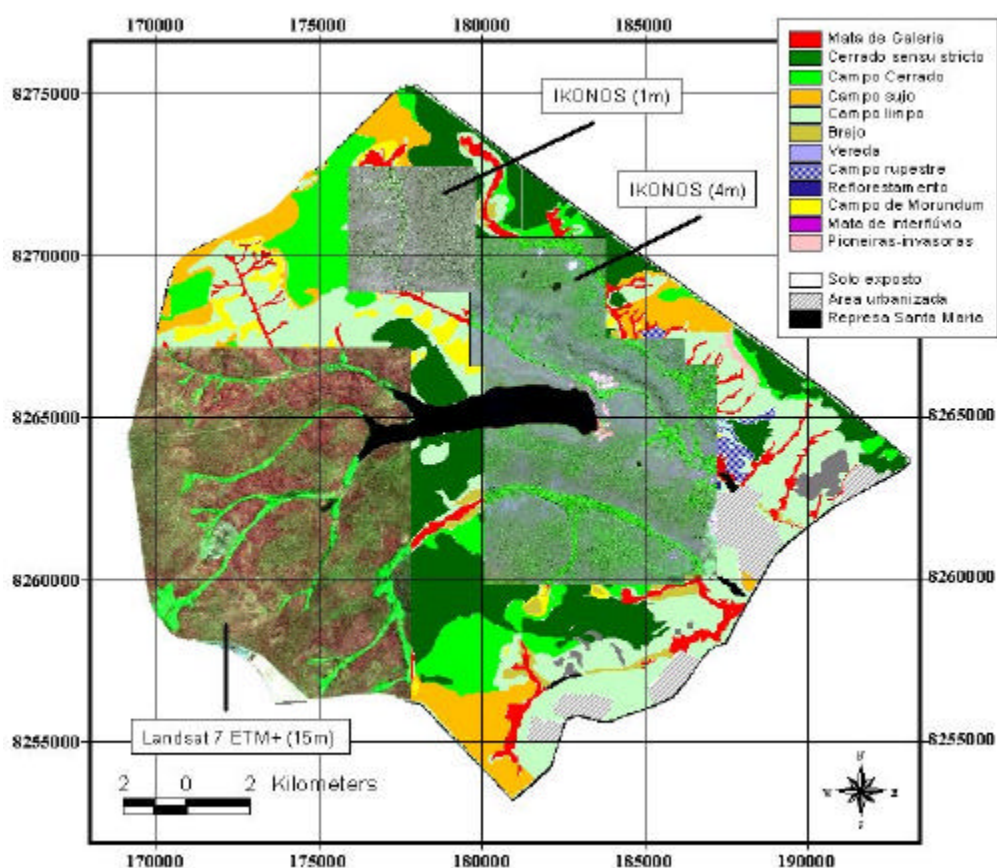


Figura 1. Área de Estudo. Mapa de cobertura vegetal do Parque Nacional de Brasília, atualizado através das cenas Landsat 7 ETM⁺ e IKONOS (1m e 4m).

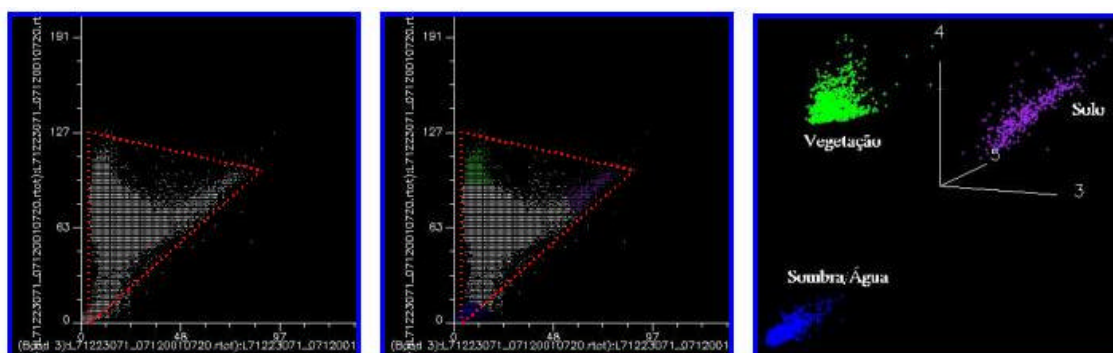


Figura 2. Espaço amostral vermelho - infravermelho, com a localização dos componentes *vegetação*, *solo* e *sombra*.

A resposta espectral de cada um dos três *endmember*, e posteriormente aplicadas no MLME, podem ser verificadas na **Figura 3**. O método WLS (*Weighted Least Square*) foi utilizado para estimar a proporção de cada componente dentro do *pixel*. Três imagens-fração (*vegetação*, *solo* e *sombra*) do Parque Nacional de Brasília foram geradas. Uma “imagem-erro” também foi adicionada a esta análise.

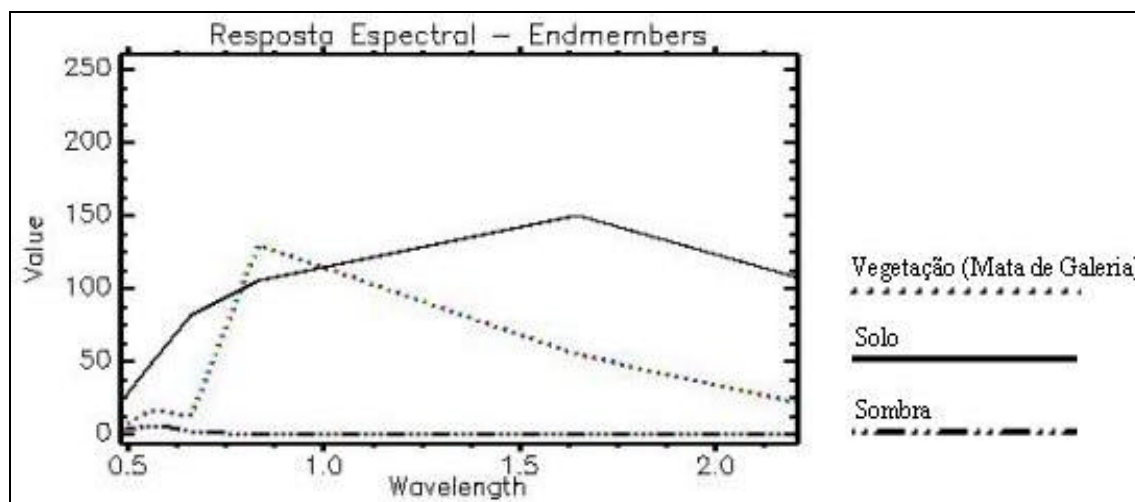


Figura 3. Resposta espectral dos componentes *vegetação*, *solo* e *sombra*, extraídas da imagem Landsat 7 ETM⁺, na área do Parque Nacional de Brasília.

4 - Resultados e Considerações Finais

Na **Figura 4** são apresentadas as imagens-fração (bandas sintéticas), geradas com o método WLS, contendo as proporções para os componentes *vegetação* (Mata de Galeria), *solo* e *sombra* (água). Bandas sintéticas utilizando o método CLS foram geradas, com resultados muito similares ao WLS. Contudo, optou-se pelo método WLS, haja vista este ter destacado melhor as proporções dos respectivos componentes.

De uma forma geral, todos os componentes foram bem realçados, com proporções entre 0.7 e 1.0 (*pixels* com maior brilho) para todos os *endmembers* amostrados. A imagem-fração *solo* destacou, além dos pontos com solo exposto, aquelas áreas correspondentes ao extrato herbáceo (e.g. Campo Limpo - manchas mais claras na imagem-fração *solo*), onde a presença de um componente arbustivo (e.g. Campo Cerrado, Cerrado *sensu stricto*) ou arbórescente (e.g. Cerradão, Mata de Galeria) é praticamente nula. No outro extremo, encontra-se a imagem-fração *vegetação*, a qual destacou, além das áreas com maior vigor vegetacional (Mata de Galeria), fisionomias de Cerrado pertencentes ao extrato arbustivo.

Ainda na **Figura 4**, uma composição colorida foi gerada com as frações *vegetação* (Red), *solo* (Green) e *sombra* (Blue), indicando visualmente a discriminação de pelo menos 4 classes de Cerrado: Campo Limpo, Campo Cerrado, Cerrado *sensu stricto*, e Mata de Galeria.

A imagem-erro (**Figura 5**) indica o inverso das imagens-fração, ou seja, áreas de maior brilho correspondem ao maior erro (valor residual) presente em cada *pixel*. Dessa forma, as proporções de componentes não definidos no modelo de mistura e/ou não solucionadas (classificadas) pelo método utilizado no processamento (e.g. WLS, CLS, e outros), são destacados em diferentes níveis de cinza, conforme o valor residual. Especificamente no PNB, observou-se que na imagem-erro as manchas mais claras obedecem à presença de fitofisionomias de Cerrado com baixa biomassa, tal como Campo Limpo / Campo Sujo, classes estas não incluídas no conjunto de *endmembers* avaliados, com valores residuais em torno de 11. À medida que as fitofisionomias aproximam-se do componente arbóreo / florestal (Mata de Galeria), o erro diminui para valores em torno de 8 (áreas de Campo Cerrado) e 4 (áreas de Cerrado *sensu stricto*). Nas áreas com nível de cinza escuro, referentes aos componentes aplicados no modelo de mistura, o erro ficou entre 0 e 2. Tais resultados indicam uma confiabilidade maior quanto ao conjunto de *endmembers* amostrados na imagem.

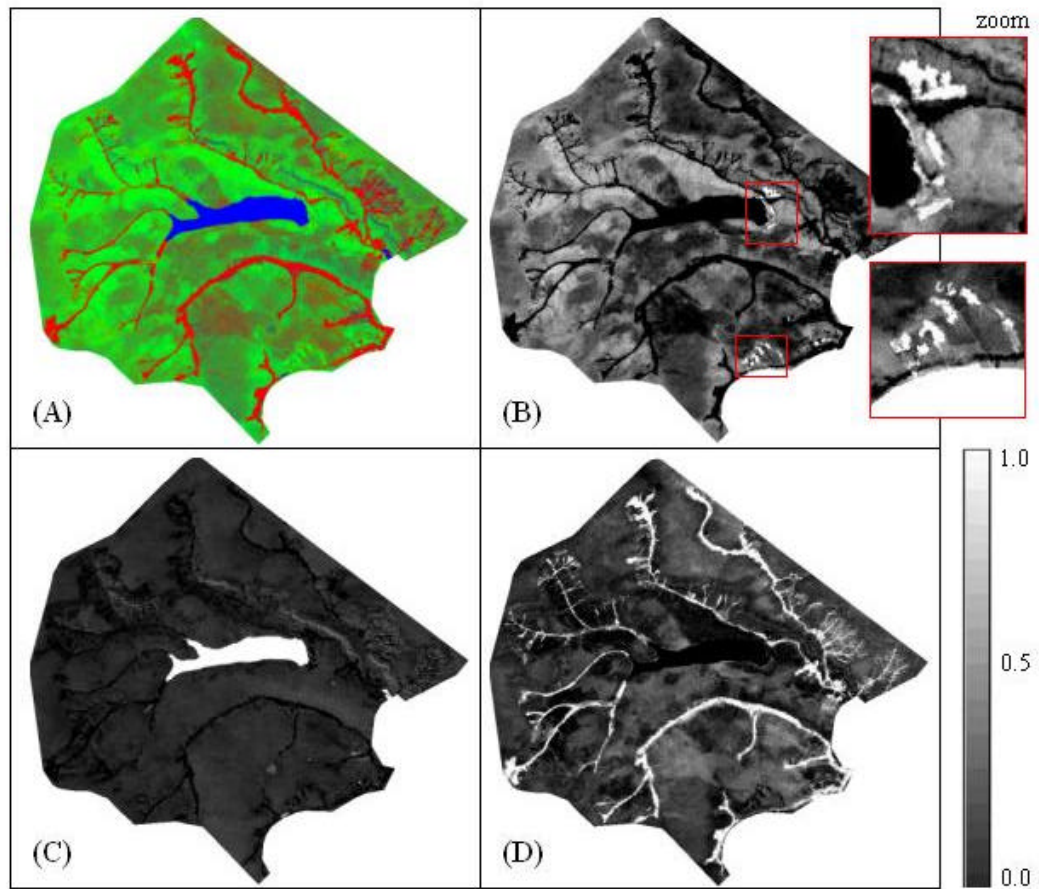


Figura 4. Imagens-fração do Parque Nacional de Brasília: (A) composição colorida (R - vegetação, G - solo, B - sombra);; (B) solo; (C) sombra (água); e (D) vegetação.

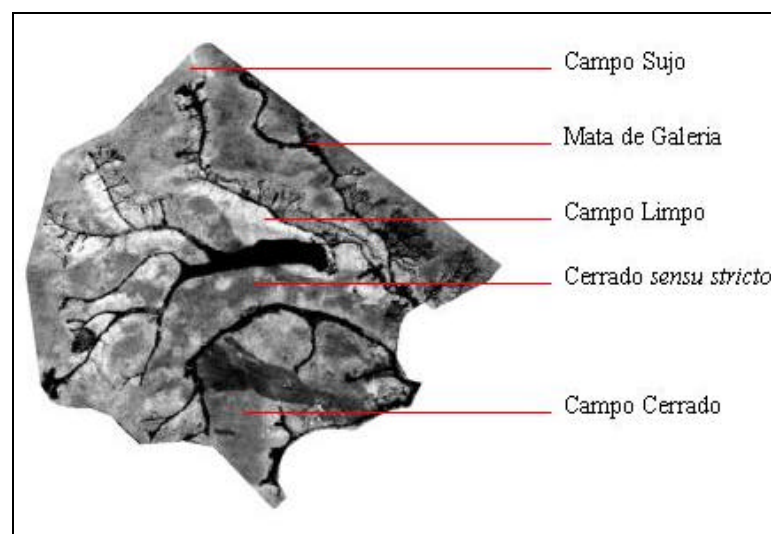


Figura 5. Imagem-erro correspondente às imagens-fração do PNB.

Em fato, os resultados demonstram o potencial do MLME para o mapeamento dos componentes florestais, arbóreas, arbustivos e herbáceos, encontrados no bioma Cerrado. No momento estamos avaliando o uso do modelo de mistura aplicado somente às fisionomias de Cerrado. Especificamente, estamos analisando o Campo Limpo, Campo Cerrado e Cerrado *sensu stricto*, haja a vista o fato destas fisionomias resultarem da mistura, em diferentes proporções, dos estratos herbáceo, arbustivo e arbóreo.

Técnicas de processamento, tal como a segmentação de imagens e o uso de algoritmos supervisionados / não-supervisionados para classificação, podem contribuir para uma análise mais efetiva e operacional destas imagens-fração, como observado em outros trabalhos que adotam esta metodologia de análise (Shimabukuro et al., 2000).

Outro aspecto que estamos considerando nesta pesquisa é o impacto da contaminação atmosférica sobre as imagens-fração geradas para o bioma Cerrado. Neste caso, os modelos de mistura espectral “vegetação, solo e sombra” e “Campo limpo, Campo Cerrado e Cerrado *sensu stricto*” estão sendo aplicados em imagens com (a) nível de cinza, (b) convertidas para nível de reflectância, bem como (c) às imagens radiométricamente retificadas, conforme metodologia desenvolvida por Hall et al. (1991).

5 - Referências Bibliográficas

- Bajjouk, T.; Populus J.; Guillaumont, B. Quantification of subpixel cover fractions using principal component analysis and a linear programming method: application to the Coastal Zone of Roscoff (France). *Remote Sensing of Environmental*, 64:153-165, 1998.
- Eiten, G. The Cerrado vegetation of Brazil. *The Botanical Review* 38 (2): 201-341, 1972.
- Ferreira, L.G.; Yoshioka, H.; Huete, A.R.; Sano, E.E. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). LBA special issue, *Remote Sensing of Environment*, 2002 (in press).
- Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multidata, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, 35: 11-27, 1991.
- Holben, B.N.; Shimabukuro, Y.E. Linear Mixing Model applied to coarse spatial resolution data from multispectral satellite sensors. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, 2231-2240, 1993.
- Sano, E.E.; Barcellos, A.O.; Bezerra, H.S. Assessing the spatial distribution of cultivated pastures in the Brazilian savanna. *Pasturas Tropicales*, 22 (3), p. 2-15, 2002.
- 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*: Brasília, vol. 33, número especial, p. 1729-1737, 1998.
- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. Fraction images derived from Landsat TM and MSS data for monitoring reforested areas. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 21, no. 1, 67-74, 1995.
- Shimabukuro, Y.E.; Duarte, V.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C. Apresentação da metodologia de criação do PRODES Digital. São José dos Campos: INPE (7520-PUD/41), p. 1-36, 2000.
- Verhoeye, J.; De Wulf, R. Land cover mapping at sub-pixel scales using linear optimization techniques. *Remote Sensing of Environment*, 79: 96-104, 2002.