

## TÉCNICAS DE MODELO DE MISTURA ESPECTRAL, SEGMENTAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS TM- LANDSAT PARA O MAPEAMENTO DO DESFLORESTAMENTO DA AMAZÔNIA

ELIANA MARIA KALIL MELLO, JOSÉ CARLOS MOREIRA, JOÃO ROBERTO DOS SANTOS, YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO, VALDETE DUARTE, IRIS DE MARCELHAS SOUZA, CLAUDIO CLEMENTE BARBOSA, RICARDO CARTAXO MODESTO DE SOUZA, JOÃO ARGEMIRO DE CARVALHO PAIVA

**INPE**-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Av. dos Astronautas, 1758 -  
CEP:12201-970 - São José dos Campos, SP  
Telefone: (012) 3945-6487 Fax: (012) 3945-6468

kalil@ltid.inpe.br, moreira@dpi.inpe.br, jroberto@ltid.inpe.br,  
yosio@ltid.inpe.br, valdete@ltid.inpe.br, iris@ltid.inpe.br,  
claudio@dpi.inpe.br, cartaxo@dpi.inpe.br, miro@dpi.inpe.br

**Abstract.** The objective of this work is to establish an operational procedure, actually in use at INPE, to identify and map deforested areas in Brazilian Amazon based on digital classification of Landsat TM images. The Linear Spectral Mixing Model available in the software package SPRING, developed at INPE, transforms the original Landsat bands: TM3 (0,63-0,69  $\mu\text{m}$ ), TM4 (0,76-0,90 $\mu\text{m}$ ) e TM5 (1,55-1,75 $\mu\text{m}$ ) into shade vegetation and soil fraction-images in which forest and deforested areas present a large distinction.

**Keywords:** deforestation, amazon, linear spectral mixing model, image segmentation, image classification

### 1. INTRODUÇÃO

O Prodes – Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia é considerado o maior projeto de monitoramento de florestas do mundo utilizando técnicas de sensoriamento remoto por satélite, com suporte de um sistema de informações geográficas.

O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), há muitos anos, promove, através do projeto PRODES, a interpretação de imagens do satélite Americano Landsat, tendo como objetivo acompanhar a evolução do desflorestamento bruto da Amazônia Legal, inicialmente utilizando o software SGI – Sistema Geográfico de Informações e posteriormente o SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (INPE-DPI, 2002), desenvolvidos pelo INPE.

Este projeto gerou resultados para o período de 1978, 1984 até 1988, somente para as áreas onde o desmatamento era mais acentuado e 1989 a 2000, baseado no conjunto total de imagens que cobrem a Amazônia e estimativa para o período de 2000/2001, baseada em uma amostra composta por 50 imagens que cobrem a área crítica do desflorestamento denominado Arco do Desflorestamento ( INPE, 2002 ).

Atualmente está sendo realizado o levantamento do conjunto total de imagens do ano 2001 e em seguida está prevista a realização do incremento para o ano 2002, com publicação para meados do ano 2003.

Desde 1994 engenheiros e pesquisadores da OBT – Coordenadoria de Observação da Terra, das Divisões de Sensoriamento Remoto e de Processamento de Imagens desenvolvem uma alternativa ao mapeamento sistemático realizado pelo INPE, com o intuito de introduzir automação em algumas etapas do projeto de Monitoramento da Floresta Amazônica (Alves, 1992 e 1996) e (Shimabukuro, 1998 e 2000). A partir de 1999, utilizando cenas TM/Landsat do ano de 1997, o objetivo dos estudos foi alcançado. Este avanço tecnológico que permitiu automatizar algumas etapas, exigiu uma formação mais especializada dos técnicos envolvidos

no projeto, mas em contra partida reduziu custos e o número de horas trabalhadas. Foi necessário também a atualização dos Laboratórios de Geoprocessamento e de Processamento de Imagens dos prestadores de serviço.

O presente trabalho estabelece o procedimento aplicativo, atualmente em uso pelo INPE, para identificar e mapear áreas desflorestadas na Amazônia Brasileira, através de processamento digital de imagens TM/Landsat.

Para reduzir a dimensionalidade dos dados e conseqüentemente o tempo de processamento, utiliza-se o Modelo Linear de Mistura Espectral (Shimabukuro e Smith,1991), implementado no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING/INPE, que transforma as bandas originais TM3(0,63-0,69 $\mu$  m), TM4 (0,76-0,90 $\mu$  m) e TM5(1,55-1,75 $\mu$  m), em imagens-fração "sombra", "vegetação" e "solo", numa abordagem que tem permitido automatizar a discriminação das áreas de fisionomia florestal daquelas desflorestadas, resultante de um processo antropogênico dinâmico que vem se caracterizando ao longo das últimas décadas. Isso em razão do aumento da fronteira agropastoril ou mesmo, ocasionado pela exploração madeireira.

A Amazônia Brasileira, ou Amazônia Legal abrange cerca de 5 milhões de km<sup>2</sup> (**Figura 1**).



Figura 1. - Mosaico da Amazônia Legal, coberto por 229 imagens TM/Landsat  
Fonte: Programa Amazônia/INPE (datas das passagens : 1999 e 2000 ).

A região dos estudos realizados pelo INPE compreende áreas exclusivamente pertencentes ao domínio de vegetação de fisionomia florestal, que corresponde a 4 milhões de km<sup>2</sup> (**Figura 2**).

Esta metodologia discute com detalhe os dados mais recentes levantados pelo INPE, correspondentes à região pertencente às cenas que cobrem todo o "arco de desflorestamento" na Amazônia Legal, onde as ações de fiscalização governamental tem maior prioridade e expansão para toda a Amazônia.

As datas de passagens utilizadas foram de julho a dezembro de 1997, 2000 e 2001, futuramente será mapeado o incremento do desflorestamento para a mesma época do ano de 2002.

Encontra-se na primeira região de trabalho cenas de todo estado do Acre, Mato Grosso, parte do Pará e Rondônia, este último tem uma complexidade de interpretação por apresentar áreas desflorestadas num "fishbone pattern", onde as propriedades rurais variam de 40 a 100 hectares e muitas vezes, o incremento anual do desflorestamento bruto é particionado aleatoriamente nas proximidades desses projetos agropastoris já implantados, numa

distribuição em mínimas áreas com valores até de 6 ha, de difícil delineamento por processo de interpretação visual. A segunda região é formada pelos estados do Amazonas, Roraima, Amapá, Tocantins, restante do Pará e Maranhão até o limite da Amazônia Legal.

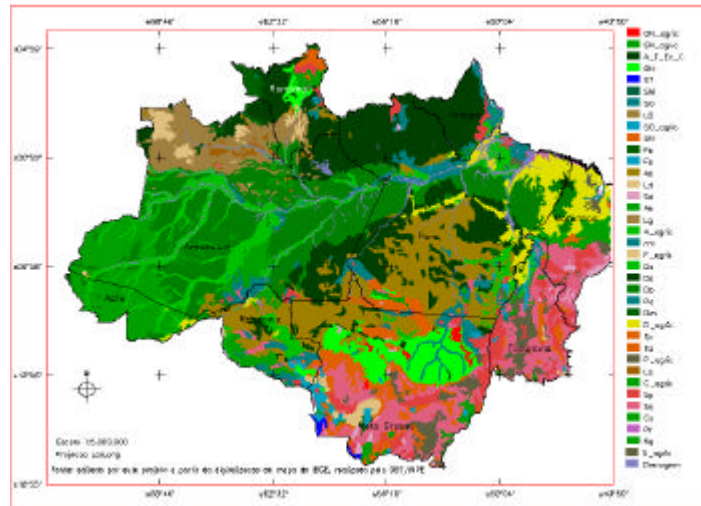


Figura 2. - Mapa da Vegetação da Amazônia Legal

Fonte: IBGE - RADAMBRASIL, INPE-ProjetoPRODES/OBT e ProjetoPROVEG/CPTEC.

O produto SPRING-Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas utilizado neste trabalho- é um banco de dados geográfico de 2ª geração, desenvolvido pelo INPE para ambientes UNIX e Windows. Os sistemas desta geração são concebidos para uso em conjunto com ambientes cliente-servidor. Usualmente, tais sistemas funcionam acoplados a gerenciadores de bancos de dados relacionais.

O SPRING tem como objetivos:

- Integrar as tecnologias de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica.
- Utilizar modelo de dados orientado a objetos, que melhor reflete a metodologia de trabalho de estudos ambientais e cadastrais.
- Fornecer ao usuário um ambiente interativo para visualizar, manipular e editar imagens e dados geográficos.

A característica amigável na operação de manuseio do SPRING, o procedimento metodológico adotado e a série de informações geradas sobre o desflorestamento, de rápida manipulação de análise, trazem um ganho de qualidade à comunidade técnico-científica que lida com as questões ambientais do país, sobretudo naqueles estudos que modelam as transformações e seus efeitos em nível global.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Seleção do Material

Em consulta aos arquivos do Departamento de Geração de Imagens do INPE/CPta, foram analisadas as imagens do ano de interesse e selecionadas aquelas com cobertura de nuvens mínima e com melhor visibilidade.

As imagens de satélite foram processadas com introdução de correções de sistema, com nível de correção geométrica igual a 6 e em projeção UTM, gerando um produto cartográfico com erro interno igual a 50 m.

Após selecionadas as bandas TM3, TM4 e TM5, estes dados digitais foram gravados em formato Geotiff, em CD-ROM.

## **2.2. Georreferenciamento das Imagens LANDSAT-TM**

### **2.2.1 - Leitura da Imagem**

O módulo IMPIMA do produto SPRING foi utilizado neste trabalho para se obter imagens no formato GRIB (Gridded binary), através de leitura de imagens por dispositivo CD-ROM, adquiridas a partir dos sensores Landsat-TM.

### **2.2.2 - Criação do Banco de Dados e Projeto**

A partir da criação dos bancos de dados e dos projetos pode-se receber as imagens para serem analisadas no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING). Estes bancos contém os planos de informação para as categorias imagem e mapeamento temático representando as bandas espectrais e os temas de interesse. Os temas definidos foram floresta (floresta tropical densa até cerradão), não floresta (áreas ocupadas com cerrado e com afloramento rochoso), desflorestamento, hidrografia e nuvem.

### **2.2.3 - Registro**

O registro de uma imagem compreende uma transformação geométrica que relaciona coordenadas de imagem (linha, coluna) com coordenadas de um sistema de referência.

O georreferenciamento das imagens, neste trabalho, foi feito registrando as imagens com cartas topográficas na escala 1: 100 000 escaneizadas, através da aquisição de poucos pontos de controle, já que trata-se de imagens geometricamente corrigidas. O SPRING pode reconhecer imagens TM-Landsat com correção geométrica de sistema e tratá-las de modo especial durante o registro. Nas regiões na Amazônia onde não existem cartas na escala 1: 100 000 foram utilizadas cartas na escala 1: 250 000 e a inclusão de pontos de controle nas áreas de overlap, entre as cenas, aproveitando o georreferenciamento das imagens adjacentes.

A correção de sistema baseia-se no uso de parâmetros físicos inerentes à situação de aquisição de cada imagem (efemérides e atitude da plataforma, sistema de imageamento do sensor e modelo de referência para a Terra). Como resultado obtém-se uma imagem em que os pixels já observam um posicionamento relativo condizente com o de um certo sistema de projeção, restando apenas uma translação residual oriunda da incerteza na posição do satélite. Trata-se de uma imagem cuja geometria interna está bem resolvida e não necessita ser modelada por transformações polinomiais.

Outra vantagem se relaciona ao fato de que os pontos de controle não precisam estar bem distribuídos por toda a área a ser registrada.

### **2.2.4 - Importação das Imagens**

A última etapa realizada dentro deste item foi a importação das imagens para os projetos criados anteriormente.

## **2.3. Modelo Linear de Mistura Espectral**

O modelo linear de mistura espectral visa estimar a proporção dos componentes solo, vegetação e sombra, para cada pixel, a partir da resposta espectral nas diversas bandas do TM, gerando as imagens-fração solo, vegetação e sombra.

O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = a \cdot \text{vege}_i + b \cdot \text{soloi} + c \cdot \text{sombrai} + e_i,$$

onde  $r_i$  é a resposta do pixel na banda  $i$ ;  $a$ ,  $b$  e  $c$  são as proporções de vegetação, solo e sombra (ou água);  $e_i$  é o erro na banda  $i$  e  $i$  indica a banda do TM (Shimabukuro, 1998).

Foram utilizadas as bandas 3, 4 e 5 do TM-Landsat, formando um sistema de equações lineares que pode ser resolvido utilizando o método dos Mínimos Quadrados Ponderado.

As três bandas geradas representam a proporção de vegetação, de solo e de sombra existente em cada pixel da imagem.

Neste trabalho foram utilizadas principalmente as imagens fração sombra e solo, pois as imagens sombra proporcionam um grande contraste entre áreas florestadas, de média quantidade de sombras e áreas desflorestadas, com baixa quantidade de sombras; e as imagens fração solo por apresentarem as áreas de não floresta e floresta bem diferenciadas.

#### **2.4. Segmentação das Imagens Fração-Sombra e Solo**

A segmentação de imagem é uma técnica de agrupamentos de dados, na qual somente as regiões espacialmente adjacentes podem ser agrupadas (Bins, 1992).

Para realizar a segmentação é necessário definir dois limiares:

a) o limiar de similaridade, limiar mínimo, abaixo do qual duas regiões são consideradas similares e agrupadas em uma única região; e

b) o limiar de área, valor de área mínima, dado em número de pixels, para que uma região seja individualizada.

As imagens fração-sombra e solo, geradas a partir da técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral nas imagens originais das três bandas ópticas, foram segmentadas pelo método de crescimento de regiões, utilizando os limiares de similaridade e de área 8 e 16, respectivamente.

#### **2.5. Classificação das Imagens Fração-Sombra e Solo Segmentadas**

Posteriormente ao processo segmentador, as imagens fração foram classificadas por algoritmo não supervisionado (ISOSEG). O classificador ISOSEG é um algoritmo de agrupamento de dados não-supervisionado para classificar regiões de uma imagem segmentada.

As regiões são caracterizadas por seus atributos estatísticos de média e matriz de covariância, e também pela área.

No presente trabalho foram utilizados os limiares de aceitação iguais a 99%, 90% ou 75% e os temas resultantes da classificação foram associados às classes definidas no banco de dados.

### **3. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO**

#### **3.1 - Mapeamento da Extensão-1997, Edição e Atualização 2000 e 2001**

O mapeamento temático foi realizado tendo como definição as classes de floresta - representado em verde, não-floresta - representado em rosa escuro ou pink, desflorestamento - extensão representado em amarelo correspondente ao ano 1997 e incremento 2000 apresentado em vermelho, hidrografia - representado em azul e nuvens - representado em cinza correspondente ao ano de 1997 e na cor lilás o ano 2000, integrados ao mapa da

Amazônia Legal ( **Figuras 3 e 3.1** ), cujos delineamentos foram editados e auditados por fotointérpretes experientes para estabelecer a acurácia do produto-resultante.

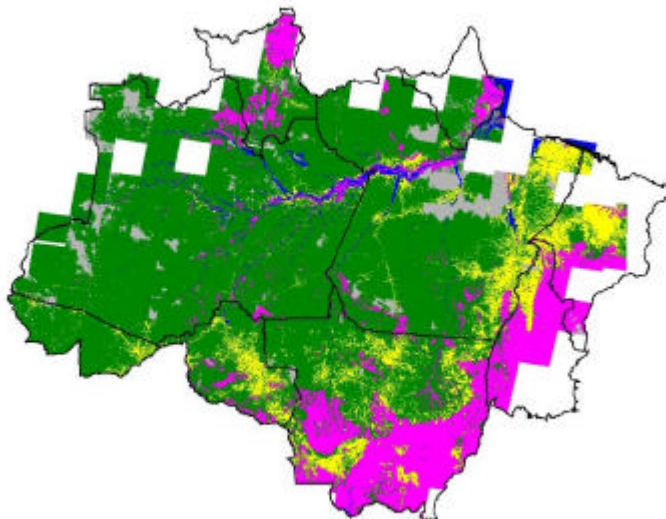


Figura 3- Mosaico da Extensão do Desflorestamento de 1997 sobre 182 imagens da Amazônia  
Fonte: Programa Amazônia/INPE-ProdesDigital\_1997.

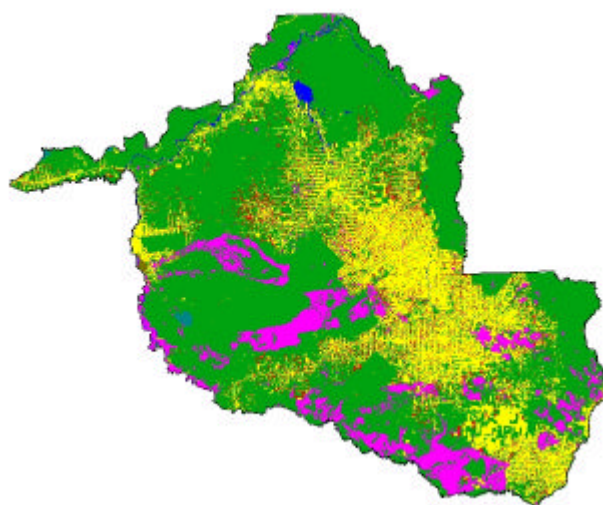


Figura 3.1-Extensão do Desflorestamento 1997 e incremento 2000 sobre o Estado de Rondônia  
Fonte: Programa Amazônia/INPE-ProdesDigital\_2000.

Os polígonos de incremento identificados e mapeados visualmente no Prodes, pertencentes às passagens de 1988 até 1997, foram digitalizados através de um "scanner" e incorporados ao levantamento automatizado do desflorestamento, ou extensão do desflorestamento para o ano de 1997.

Este processo foi utilizado para verificação do mapeamento digital e auxiliar na edição dos temas de interesse, já que o mapeamento automatizado da extensão do desflorestamento foi realizado com uma única passagem sobre toda a área de interesse.

Com o mapeamento do desflorestamento do ano de 1997 concluído, foi realizado em seguida, também sobre a região do Arco do Desflorestamento, o levantamento do incremento para 2000 e 2001.

As cenas 2000 foram registradas com as cenas anteriores que continham a extensão do desflorestamento bruto daquela região em 1997, e posteriormente as cenas 2001 também foram registradas com as cenas 2000.

Utilizando a LEGAL, Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra (INPE-DPI, 2002) , é possível eliminar das imagens os polígonos já anteriormente classificados como desflorestamento em 1997.

Isto está sendo realizado para demonstrar a capacidade da abordagem na detecção do incremento do desflorestamento bruto no período de 1997/2000 e 2000/2001 considerados, o que é de suma importância para estabelecer a magnitude, a direção e a estimativa da taxa média anual do processo de antropização, permitindo subsidiar os estudos de causas/efeitos para um maior aprimoramento dos programas de fiscalização, sustentabilidade e conservação da biodiversidade de áreas na Amazônia.

O procedimento utilizado neste trabalho mostrou ser viável realizar o mapeamento da extensão e do incremento do desflorestamento da Amazônia Legal, usando o SPRING, através de técnicas de segmentação e classificação da imagem fração sombra e solo, derivadas do modelo de mistura espectral.

Após estes levantamentos à área de trabalho expandiu de 112 para 182 cenas TM-Landsat, ano 1997, sobre a Amazônia Legal. O conjunto de dados de incrementos do ano 2000 também foi expandido para o restante da Amazônia, ficando de fora apenas algumas áreas sob nuvens e áreas de não floresta. Encontra-se em planejamento a expansão do incremento para o ano 2001, extrapolando o levantamento das áreas prioritárias já realizado (INPE, 2002).

O resultado gerado representa 80 a 90% do esforço fotointerpretativo - nas regiões críticas -, e da fase de geração dos dados digitais realizados no PRODES (Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia), através da análise visual das imagens TM-Landsat.

O produto é georreferenciado, eliminando as distorções geométricas e conseqüente falta de ajuste dos polígonos que ocorriam anteriormente no PRODES em áreas complexas, e permite o levantamento extensivo multitemporal de uma mesma região.

Além disto ele gera um banco de dados sobre as áreas desflorestadas na Amazônia Legal, podendo ser integrado com dados de outras fontes, quer seja relativos às questões de limites político-administrativos e até mesmo sócio-econômicos.

Alguns projetos, nacionais como o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) estão utilizando os mapas da Alteração da Cobertura Florestal na Amazônia Legal, gerados pelo PRODESDIGITAL.

Em meados de 1999, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) recebeu a tarefa de coordenar o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) de todo território brasileiro. Desde então, a Secretaria de Políticas para o Desenvolvimento Sustentável, responsável pelo projeto ficou com o trabalho de organizar uma estrutura geral para o ZEE no Brasil e buscar parcerias institucionais, com o objetivo de formular um programa de ações compartilhadas.

O ZEE é conceituado como um instrumento técnico e político. Por isso, a Secretaria de Políticas para o Desenvolvimento Sustentável procurou reunir toda a competência técnica das instituições públicas brasileiras, colocar à disposição do cidadão e criar mecanismos de desenvolvimento e participação para a discussão dos seus resultados.

No Portal do ZEE ( <http://www.zeebrasil.org.br> ) é possível visualizar a estrutura geral do Programa e as diretrizes metodológicas básicas para a elaboração do ZEE no território brasileiro.

Outras coordenadorias do INPE, estão também se beneficiando dos dados do PRODESDIGITAL, como por exemplo o PROVEG ( <http://www.cptec.inpe.br/proveg> ), este projeto tem como objetivo a melhoria da máscara de representação da superfície utilizada pelos modelos de previsão de tempo e clima utilizados no CPTEC.

Para isto, foram utilizados dados de mapas digitais do RADAM-IBGE (1:5.000.000), dados temáticos de desflorestamento provenientes do projeto “Ação Monitoramento Ambiental da Amazônia” - Programa AMAZÔNIA/OBT/INPE-MCT e imagens TM Landsat.

Foi desenvolvida uma metodologia para obtenção de uma representação acurada e detalhada da superfície, adaptada aos tipos de vegetação considerados nos modelos. Através de segmentação e classificação das imagens TM Landsat obteve-se a separabilidade de biomas que, no mapa do IBGE, encontravam-se agregados.

O mapa do IBGE foi, então, reclassificado conforme uma compatibilização previamente definida entre as classes do RADAM-IBGE e as classes utilizadas pelo modelo de superfície SSiB. A este mapa foram integrados os dados do desflorestamento da Amazônia.

O produto final é um mapa que, comparado àquele atualmente utilizado no CPTEC, mostrou-se com uma representação da superfície mais realista, o que permitirá uma melhoria na previsão de tempo e clima.

#### **4. BIBLIOGRAFIA**

Alves, D.S., Mello, E.M.K., Moreira, J.C., Ortiz, J.O., Soares, J.V., Fernandez, O., Almeida, S. Characterizing Land Use Dynamics in Amazon Using Multi-Temporal Imagery and Segmentation Techniques. ISPRS, Vienna, 1996. pp. 13-17.

Alves, D.S., Meira Filho, L.G., D'Alge, J.C.L., Mello, E.M.K., Moreira, J.C., De Medeiros, J.S. The Amazonia Information System. ISPRS, Washington, 1992. Vol.28, pp. 259-266.

Bins, L.S., Erthal, G.J., e Fonseca, L. M.G. Um método de classificação não-supervisionada por regiões. Proceedings of Sixth Brazilian Symposium on Graphic Computation and Image Processing. Recife, Brasil, 1992. pp. 65-68.

INPE- DPI (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Processamento de Imagens). SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, Manual do Usuário, São José dos Campos, 2002. ( <http://www.dpi.inpe.br/spring> ).

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Monitoring of the Brazilian Amazonian Forest by satellite : 2000 - 2001. INPE, São José dos Campos, 2002. 24 p. . ( <http://www.inpe.br> ).

Shimabukuro, Y.E., Santos, J.R., Duarte, V., Mello, E.M.K., Moreira, J.C., Souza, R.C.M. Apresentação da Metodologia de Criação do Prodes Digital. São José dos Campos, Brasil, 2000. Publicação INPE-7520-Pud/41.

Shimabukuro, Y.E., Batista, G.T., Mello, E.M.K., Moreira, J.C. e Duarte, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon Region. International Journal of Remote Sensing, 1998. 19(3): 535-541.