

## Classificação semi-automática de imagens multitemporais Landsat para a determinação dos estágios sucessionais de uma área de desflorestamento na Amazônia

Fernando Del Bon Espírito-Santo<sup>1</sup>

Yosio Edemir Shimabukuro<sup>1</sup>

João Roberto dos Santos<sup>1</sup>

Tatiana Mora kuplich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
fernando@dsr.inpe.br

**Abstract.** Tropical forest successional stages have been mapped previously with multitemporal satellite sensor imagery. The precise identification and classification of such stages, however, has proved difficult. This letter presents a new method for the classification of forest successional stages following deforestation in Brazilian Amazonia. Multitemporal Landsat TM and ETM+ and derived fraction images and field data were used in a semi-automatic classification approach. The results were encouraging and signal the application of the method for the entire Brazilian Amazonian.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, forest, sensoriamento remoto, processamento de imagens, floresta.

### 1. Introdução

O desflorestamento na Amazônia é um fenômeno relativamente recente, e que, portanto o histórico dessas áreas, em particular as de sucessão secundária, podem ser remontadas através dos arquivos das primeiras imagens Landsat (Tardin *et al.* 1980). A identificação dos estágios sucessionais das áreas de regeneração, tem sido realizada basicamente com o uso de imagens multitemporais. No entanto, para a determinação dos estágios sucessionais (sucessão secundária inicial - SS1, intermediária - SS2 e avançada - SS3) são utilizados os atributos espectrais para cada uma dessas fitofisiônomas, que geralmente, provocam muitas confusões nas classificações das imagens de satélites (Mausel *et al.* 1995).

Este trabalho apresenta uma metodologia de mapeamento semi-automático das áreas de sucessão secundária da região da Floresta Nacional do Tapajós (FNT) no Estado do Pará. O mapa de cobertura vegetal foi realizado através do processamento das imagens Landsat de 1988, 1997, 1999 e 2001. Em cada uma dessas imagens foram classificados somente os temas com pequenas confusões espectrais como: floresta (FL), sucessão secundária (SS), solo exposto (Sexp), pasto limpo (PL) e água (A). A identificação dos estágios regenerativos das áreas de SS foi realizada através de uma análise hierárquica dos planos de informações multitemporais. Nesse procedimento, os erros das classificações entre os temas F e SS3 e SS1 e SS2 que ocorrem geralmente, foram minimizados. Essa metodologia pode ser facilmente empregada em diferentes áreas de desflorestamento da Amazônia.

### 2. Área de estudo

A área de estudo está localizada no Estado do Pará, entre os paralelos de 2° 45' e 4° 10' de latitude sul e entre os meridianos de 54° 45' e 55° 30' de longitude oeste. Nessa região encontram-se as rodovias Cuiabá-Santarém (BR 163) ao norte, a Transamazônica ao sul, a FNT e diversos núcleos urbanos (Aveiro, Belterra, Agrovila Presidente Médice e Rurópolis). Apesar do uso restrito dos recursos florestais na FLONA, é comum a ocorrência de desflorestamento no seu entorno. Após os desflorestamentos essas áreas são abandonadas e formadas as áreas de sucessão secundária.

### 3. Materiais e métodos

Para recobrir todo o limite da FNT, todas as imagens da órbita 227 ponto 62 foram adquiridas 4 imagens Landsat (30/07/2001, 02/08/1999, 25/06/1997 e 30/08/1988) com um deslocamento de 4 segundos ao sul da FLONA. A **Figura 1** ilustra as imagens multitemporais Landsat utilizadas para a determinação dos estágios sucessionais da FNT.

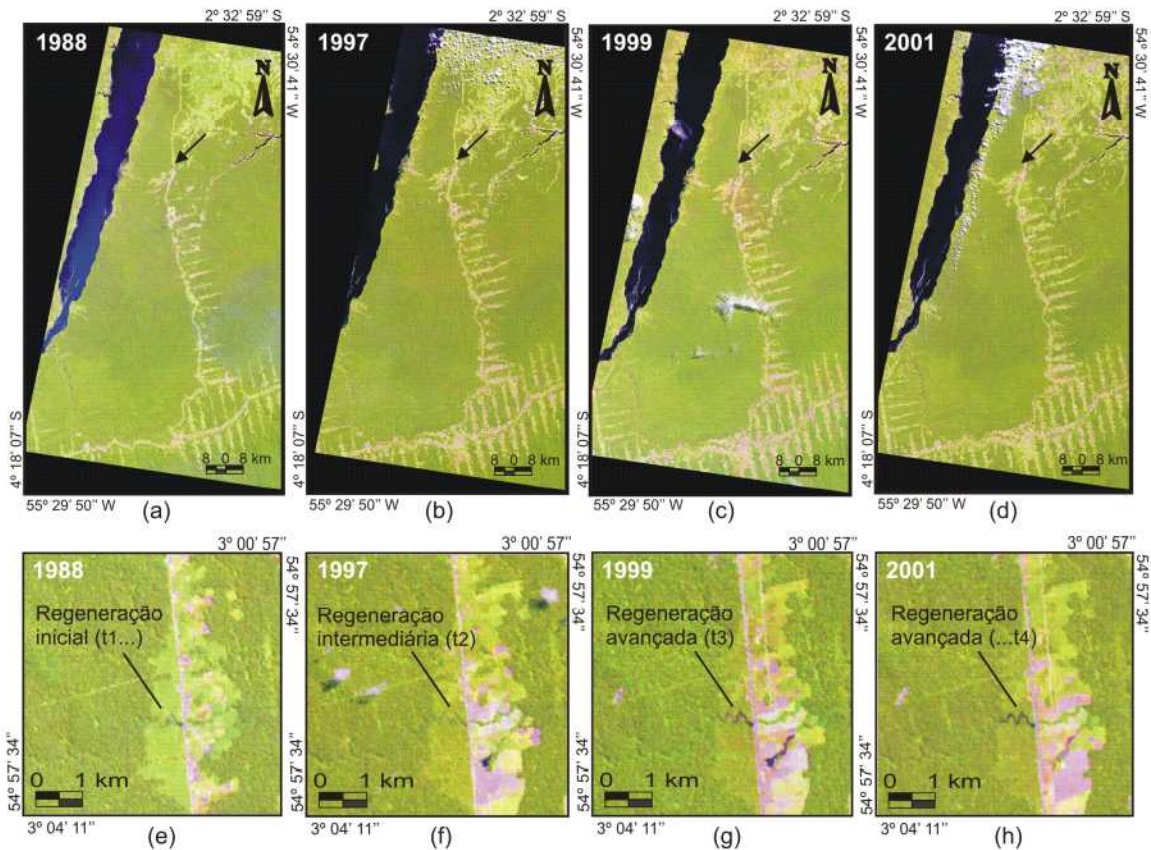


Figura 1. Imagens multitemporais Landsat (a, b, c e d) e áreas de sucessão secundária (e, f, g e h). Composição RGB (543).

Nesse trabalho, além dessas imagens foram utilizadas ainda: (1) uma faixa do sensor hiperespectral Hyperion abordo do satélite EO1, obtida no mesmo dia e hora aproximada da imagem ETM+ de 2001; (2) mosaicos de videografias aéreas das campanhas de 1999 (Hess *et al.* 2002) e de 2000; e (3) pontos trabalho de campo.

#### 3.1 Pré-processamentos

A imagens ETM+ de 2001 foi registrada utilizando 6 cartas topográficas em 1:100.000 (DSG 1984) que cobrem toda a região. A qualidade do registro foi verificada através dos pontos de GPS coletados em campo. Posteriormente, essa imagem passou por uma correção atmosférica (CA) com o uso do aplicativo 6S (Vermote *et al.* 1997). Comparando a imagem ETM+ e a Hyperion, ambas com CA, observar-se uma boa correspondência da reflectância superficial desses dois sensores, indicando uma boa correção da imagem de 2001 (**Figura 2**).

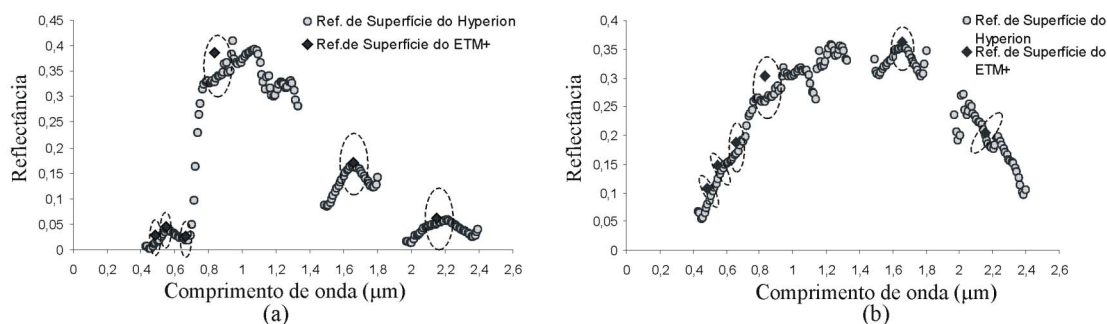


Figura 2. Comportamento espectral da vegetação e do solo entre as imagens do sensor ETM+ e hiperespectral Hyperion.

Em seguida, as demais imagens Landsat foram registradas (RMS error < 1 pixel) e aplicadas retificações radiométricas (Hall *et al.* 1991), tendo como base a imagem de 2001. Na **Figura 3** são apresentados os gráficos obtidos através da retificação das imagens multitemporais.

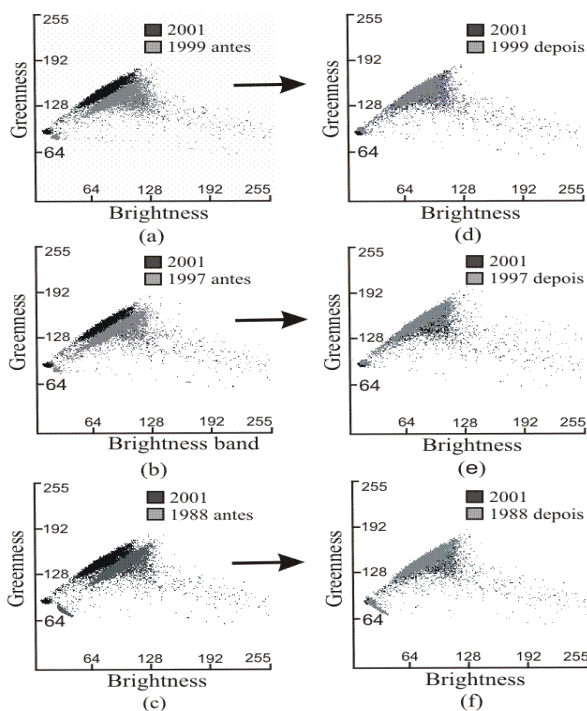


Figura 3. Gráfico de dispersão das imagens “greenness” e “brightness”, da imagem referência (preto) e as imagens a serem retificadas (cinza) antes (a, b e c) e após a retificação (d, e e f), das datas de 1999, 1997 e 1988, respectivamente.

### 3.2 Imagens fração

Após os pré-processamentos foram geradas as imagens fração do modelo linear de mistura espectral (MLME). Para isso, foram utilizadas as 6 bandas das imagens do satélite Landsat, formando um sistema de equações lineares, resolvido pelo método dos mínimos quadrados (Shimabukuro e Smith, 1991) implementado no SPRING 3.6.03 (Câmara *et al.*, 1996). A determinação dos valores espectral de cada um dos componentes do modelo foi realizada através da escolha de alvos puros dentro da própria imagem. Após o ajuste do MLME da imagem de 2001, esse mesmo modelo foi aplicado as outras imagens Landsat. Esse



procedimento foi utilizado para minimizar as variações dimensionais das imagens frações, ocasionadas pela aplicação de diferentes proporções de misturas espectrais. Na **Figura 4** é apresentado o esquema realizado nessa etapa.

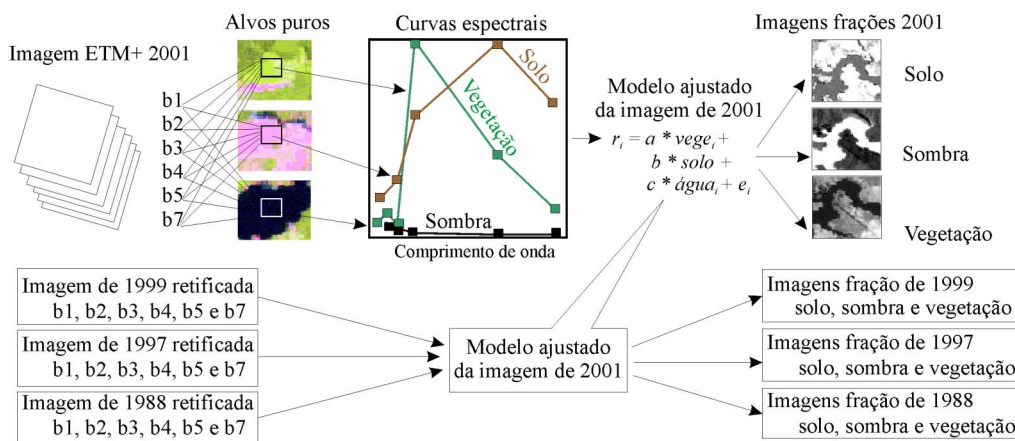


Figura 4. Esquema do ajuste do MLME das imagens multitemporais Landsat.

### 3.3 Segmentação e classificação

Após as etapas anteriores, as imagens multitemporais foram segmentadas e classificadas individualmente. Foram utilizadas seis imagens espectrais (bandas 3, 4 e 5 e imagens fração solo, sombra e vegetação). Terminada a segmentação, as imagens foram classificadas através de um classificador supervisionado por regiões Bhattacharyya (Batista *et al.*, 1994). As correções dos erros das classificações digitais foram realizadas visualmente em todas as imagens.

Nas **Figuras 5a e b**, são apresentados os mapas de cobertura vegetal da região da FNT, obtidos através do processamento individual das imagens Landsat de 1988 e 1997, respectivamente. Nesses mapas, foram mapeadas somente as classes temáticas: Floresta, vegetação aluvial, solo exposto, pasto limpo, sucessão secundária, água e Nuvem.

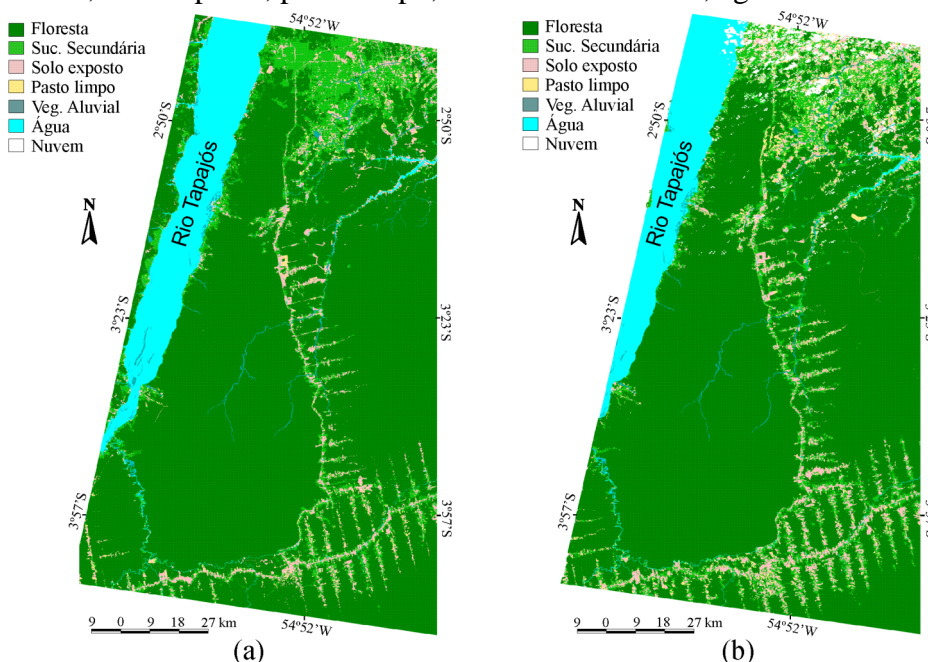


Figura 5. Mapas de cobertura vegetal da região da FNT, obtidos através da classificação das imagens de 1988 (a) e 1997 (b).

Nas **Figuras 6a e b**, são apresentados os mapas de cobertura vegetal da região da FNT, através do processamento individual das imagens Landsat de 1999 e 2001, respectivamente. Nesses mapas, as mesmas categorias temáticas 1988 e 1997, foram mantidas.

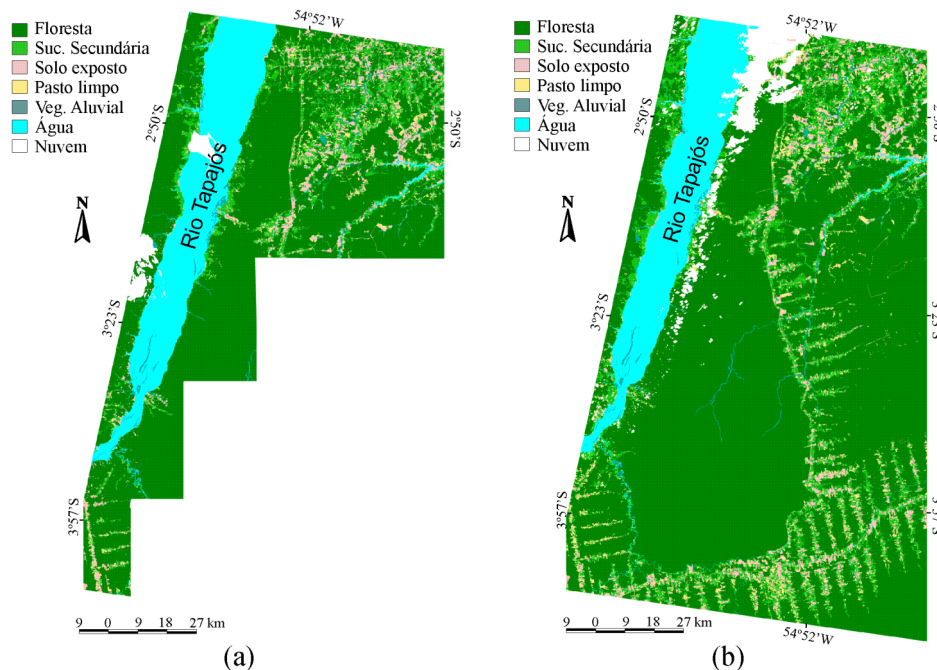


Figura 6. Mapas de cobertura vegetal da região da FNT, obtidos através da classificação das imagens de 1999 (a) e 2001 (b).

### 3.4 Metodologia de análise multitemporal

Após a classificação automática e a edição visual das imagens, as áreas com cobertura de nuvens em 1997 e 2001 com o uso da classificação da imagem de 1999. A estratificação das áreas de SS foi executada da seguinte forma:

1° Passo: Classificação da categoria Sexp, PL e A, através da imagem mais recente (2001);

2° Passo: Cruzamento entre as áreas de SS da classificação mais recente (2001) com as áreas de FL da classificação imediatamente anterior (1997), para a determinação das áreas de SS1, formadas entre o período de 1997 e 2001 (4 anos) em áreas que eram FL em 1997;

3° Passo: Cruzamento entre as áreas de FL de 2001 e desflorestamentos (Sexp + SS + PL) da classificação mais antiga (1988), para a determinação das áreas de SS3;

4° Passo: Cruzamento entre as áreas de SS de 2001 e as áreas de Sexp ou PL da classificação de 1997, para a determinação das áreas de SS1 formadas entre o período de 1997 e 2001 sobre áreas de Sexp ou PL;

5° Passo: Composição do mapa de vegetação através das áreas de Sexp, PL, SS1, SS3 (determinadas pelos passos anteriores) e FL da classificação de 2001. Os restantes das áreas foram ocupados pela classe SS2.

## 4. Resultados e discussões

Na **Figura 7** é ilustrada a metodologia de estratificação das áreas de SS em SS1, SS2 e SS3, de forma semi-automática, em uma porção da área de estudo.



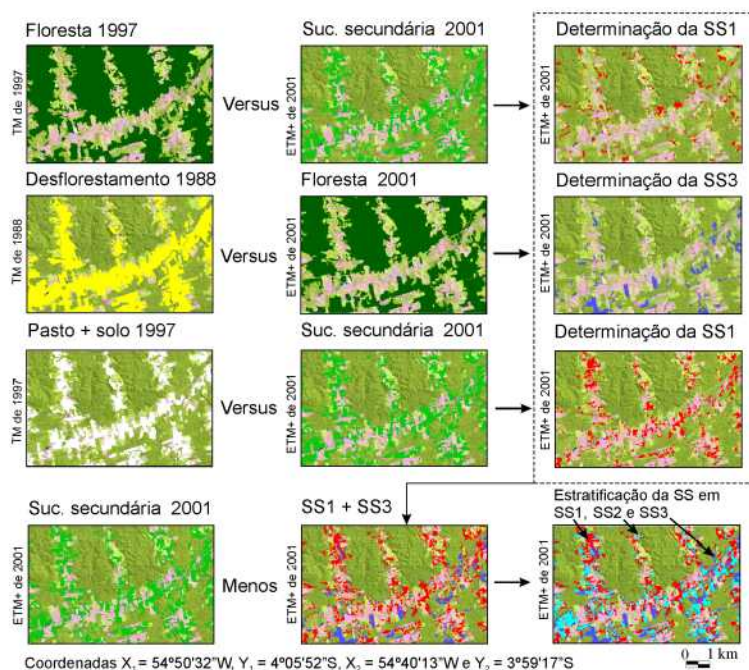


Figura 7. Classificação semi-automática das áreas de sucessão secundária.

Com o uso da metodologia foi obtido um mapa de cobertura vegetal com os estágios sucessionais (SS1, SS2 e SS3) das áreas desflorestadas da FNT, através de uma classificação semi-automática. Nesse mapa também são apresentadas as áreas de floresta dominadas por babaçu, vegetação aluvial, e áreas alteradas por incêndios florestais e atividades de corte seletivo de madeira (Figura 8), classificadas visualmente.

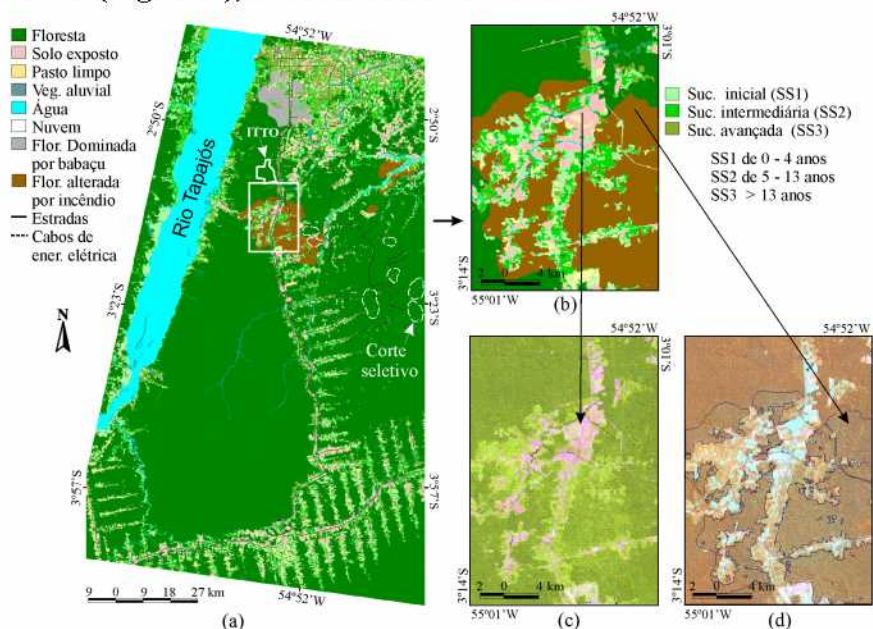


Figura 8. Classificação da cobertura vegetal da região da FNT, utilizando as imagens Landsat multitemporais (a). Em b, detalhes da estratificação das áreas de SS. Em c, detalhes da imagem ETM+ de 2001 utilizada na classificação das áreas de Sexp e PL. Em d, detalhes da imagem TM de 1999, utilizada no mapeamento das áreas alterada por incêndios florestais. A sigla ITTO é “International Tropical Timber Organization”, onde estão sendo realizadas as atividades de manejo florestal sustentável.

Além dos temas F, SS, Sexp, PL e A, efetuadas de forma automática, também foram acrescentadas as classificações obtidas pela interpretação visual das áreas alteradas por incêndios florestais, as de floresta dominada por babaçu e de vegetação aluvial, que também ocorrem na área. As áreas de corte seletivo de madeira foram apenas representadas no mapa por polígonos vetoriais.

Na **Figura 9** é apresentada a sobreposição dos 149 pontos de verdade terrestre coletado na região (videografia aérea + pontos de trabalho de campo), no mapa de cobertura vegetal produzido para a região.

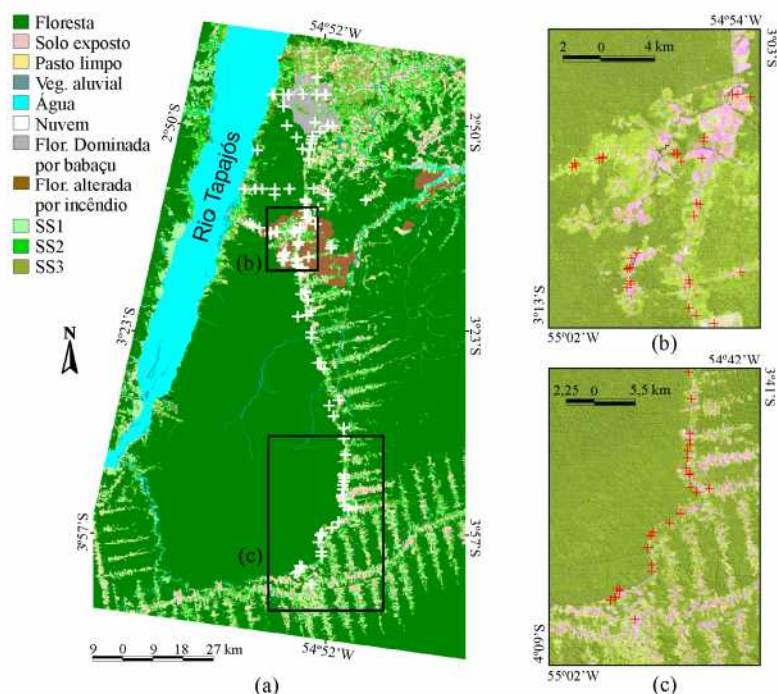


Figura 9. Distribuição dos pontos de verdade terrestre sobre o mapa de cobertura vegetal (a) e detalhes desses pontos na imagem ETM+ de 2001 (b e c).

Na **Tabela 1**, é apresentada a matriz de erro do mapeamento cobertura vegetal da FNT.

Tabela 1. Matriz de erro do mapeamento temático da FLONA do Tapajós.

		Classes do mapeamento temático										
		Fpri	Sexp	PL	SS1	SS2	SS3	Ffogo	Fba	Água	Total	Omissão
Verdade terrestre	Fpri	29				1					30	3,33%
	Sexp		33	1							34	2,94%
	PL		1	13	4						18	27,78%
	SS1				10	1					11	9,09%
	SS2	1	1	3	3	19					27	29,63%
	SS3	5			1	1	9				16	43,75%
	Ffogo							2			2	0,00%
	Fba	1							3		4	25,00%
Água									7	7	0,00%	
Total		36	35	17	18	22	9	2	3	7	<b>149</b>	
Comissão		19%	6%	24%	44%	14%	0%	0%	0%	0%		

onde: Fpri = floresta primária; Sexp = solo exposto; PL = pasto limpo; SS1 = sucessão secundária em estágio inicial; SS2 = sucessão secundária em estágio intermediário; SS3 = sucessão secundária em estágio avançado; Ffogo = floresta alterada por incêndio florestal; e Fba = floresta dominada por babaçu.

Observa-se por essa tabela que a maior confusão temática ocorreu entre a classe de Floresta primária (Fpri) e sucessão secundária avançada (SS3), apesar do uso das imagens multitemporais.

O índice de exatidão global e de kappa obtido nesse mapeamento da cobertura vegetal foi de 72,7% e 80,9%, respectivamente. O índice de kappa obtido pode ser considerado segundo a classificação de Congalton e Green (1999) como sendo muito bom.

## 5. Conclusão

A metodologia desenvolvida nesse trabalho permitiu o mapeamento dos estágios sucessionais de uma área da Amazônia, utilizando os atributos da cobertura vegetal obtido por imagens de satélite multitemporais e realizada de forma semi-automática. Nesse trabalho, os erros da classificação digital foram minimizados e as áreas de regeneração foram estratificadas em três estágios sucessionais: sucessão secundária inicial (SS1) com até 4 anos de idade, sucessão secundária intermediária (SS2) entre 5 a 13 anos de idade e sucessão secundária avançada (SS3) com mais de 13 anos.

## Agradecimentos

Ao Fundo Fundo Bunka de Pesquisa - Banco Sumito Mitsui - 2002, pelo recurso financeiro fornecido ao projeto. À FAPESP através do projeto N°:2002/00985-2. Ao INPE pelo fornecimento das imagens. Ao Projeto LBA pela cooperação nos trabalhos de campo. À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor.

## Referências

- Batista, G. T., Medeiros, J. S., Mello, E. M. K., Moreira, J. C., Bins, J. S., 1994, A new approach for deforestation assessment. **In: Proceeding of the International Symposium on Resource and environmental monitoring**, Rio de Janeiro, Brazil, ISPRS Commission VII, 26-30 September, 30, p. 170-174.
- Câmara, G, Souza, R. C. M., Freitas, U. M., Garrido, J., Mitsuo, F., 1996, SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, 20, 395-403.
- Diretoria De Serviço Geográfico (Dsg), 1984, **Folhas SA.21-Z-B-IV, SA.21-Z-B-V, SA.21-Z-D-I, SA.21-Z-D-II, SA.21-Z-D-IV e SA.21-Z-D-V**. (Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).
- Hall, F. G., Strebel, D. E., Nickeson, J. E., Goetz, S. J., 1991, Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multi-date, multi-sensor images. **Remote Sensing of Environment**, 1, 11-27.
- Congalton, R. G., 1991, A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, 37, 35-46.
- Hess, L. L., Novo, E. M. L., Slaymaker, D. M., Holt, J., Steffen, C., Valeriano, D. M., Mertes, L. A. K., Krug, T., Melack, J. M., Gastil, M., Holmes, C., Hayward, C., 2002, Geocoded digital videography for validation of land cover mapping in the Amazon basin. **International Journal of Remote Sensing**, 23, 1527-1556.
- Mausel, P.; Wu, Y.; Li, Y.; Moran, E. F.; Brondizio, E., 1993, Spectral identification of successional stages following deforestation in the Amazon. **Geocarto International**, 8, 61-71.
- Shimabukuro, Y. E., Smith, J. A., 1991, The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 29, 16-20.
- Tardim, A. T., Lee, D. C. L., Santos, R. J. R., Assis, O. R., Barbosa, M. P. S., Moreira, M. L., Pereira, M. T., Silva, D., And Santos Filho, C. P., 1980, **Subprojeto desmatamento: convênio IBDF/CNPq-INPE**. INPE-1649-RPE/103. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil.
- Vermote, E. F., Tanré, D., Deuzé, J. L., Herman, M., Morcrette, J., 1997, Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 35, 675-686.