

# Análise Multisensor e Multiresolução de Imagens CBERS-2 Através do Modelo Linear de Mistura Espectral

Ramon Morais de Freitas <sup>1</sup>  
Vitor Haertel <sup>2</sup>  
Yosio Edemir Shimabukuro <sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Caixa Postal - 15044 - Porto Alegre, RS - Brasil  
vitor.haertel@ufrgs.br

**Abstract.** The concept of mixed pixel offers a wide range of applications in the Remote Sensing area. The application of this concept, however, requires the prior estimation of the component's spectral reflectance in the spectral bands under consideration. In this study we propose a methodology to estimate the spectral reflectance for each component class in moderate spatial resolution image data, by applying the linear mixing model, and higher spatial resolution image data as auxiliary data. Experiments were carried out using CCD (20 m ground resolution) and IRMSS (80 m ground resolution), and WFI (260 m ground resolution) CBERS-2 image data, as medium and moderate spatial resolution data, respectively. The spectral reflectances for the components in the IRMSS and WFI CBERS-2 spectral bands are estimated by applying the proposed methodology. The reliability of the proposed methodology was assessed by analyzing scatter plots for CBERS-2 data and also by comparing the K-means classification of fraction images produced by image data sets of the sensors analyzed. This methodology seems to be a useful alternative for scaling up the information from local to regional and global scales.

**Palavras-chave:** Pixel mistura, modelo linear de mistura espectral, resolução espacial moderada, dados CBERS. Mixture pixel, Linear Spectral Mixture Model, moderate spatial resolution, CBERS data.

## 1. Introdução

A partir do desenvolvimento de novos sistemas sensores nos últimos anos uma crescente quantidade de dados com diferentes resoluções espaciais, espectrais e radiométricas vem sendo colocada à disposição da comunidade internacional. A utilização combinada destes dados apresenta um grande potencial e vem sendo objeto de investigação por parte de vários pesquisadores (Price, 1999). Entre as várias áreas que podem se beneficiar desta utilização conjunta, encontra-se a que diz respeito ao problema do pixel mistura. O problema da mistura ocorre sempre que a área no terreno coberta por um único pixel inclui duas ou mais classes espectrais, denominadas neste contexto de componentes. A resposta espectral resultante não é característica de nenhuma das componentes individuais, mas uma combinação das respostas espectrais destas componentes. Nestes casos, dados relativos às proporções com que cada uma das componentes entra na composição de cada pixel individual apresenta grande interesse prático, com aplicações em várias áreas, tais como florestas, agricultura, limnologia e outras. Os dados de proporções podem ser convenientemente organizados em forma de imagem, gerando desta forma, para cada componente individual uma “imagem fração”. Imagens fração envolvendo a componente “sombra”, foram utilizadas com sucesso na classificação de áreas cobertas por plantações de pinus e eucaliptos (Shimabukuro & Smith, 1991). Imagens fração foram também utilizadas com sucesso em estudos tratando da variação temporal na cobertura do solo (Adams et al., 1995; Carreiras et al. 2002; Haertel et al., 2004). Estudos envolvendo o problema da mistura em imagem NOAA/AVHRR estão também relatados na literatura (Hlavka & Spanner, 1995; Holben & Shimabukuro, 1993).

Na literatura, várias metodologias são propostas por diversos pesquisadores visando resolver o problema do pixel mistura espectral (Wang, 1990; Shimabukuro & Smith, 1991; Bowles et al., 1995; Stein, 2002; Berman et al., 2004). Neste trabalho é proposta uma metodologia para estimar as respostas espectrais dos componentes em imagens de moderada e baixa resolução espacial a partir de imagens de melhor resolução espacial através do modelo linear de mistura espectral. Para testar a metodologia proposta foram escolhidas imagens adquiridas pelos sensores CCD, IRMSS e WFI a bordo do satélite CBERS-2.

## 2. Metodologia

O modelo linear de mistura espectral faz uso da suposição de que a resposta de um pixel em cada banda espectral individual pode ser modelada por uma combinação linear ponderada das respostas espectrais das classes componentes. O fator de ponderação neste caso é dado pela fração da área do pixel ocupada pela respectiva componente. Para cada pixel individual, o modelo linear de mistura espectral pode ser expresso por:

$$R_k = \sum_{j=1}^m r_{j,k} f_j + v_k \quad (k = 1, \dots, p) \quad (1)$$

Onde,  $R_k$  representa a resposta espectral de um pixel na banda espectral  $k$ ,  $r_{j,k}$  a resposta espectral da componente  $j$  na banda espectral  $k$ ,  $f_j$  a fração da área total do pixel ocupada pela componente  $j$ ,  $m$  o número de componentes,  $v_k$  o valor do resíduo em (1) para a banda espectral  $k$  e  $p$  o número de bandas espectrais em consideração. As respostas espectrais  $R_k$  e  $r_{j,k}$  podem ser expressas em termos de refletância espectral, radiância espectral ou contador digital. Neste estudo, optou-se pela refletância espectral.

O modelo linear de mistura expresso pela equação (1) é normalmente utilizado para estimar as frações  $f_j$  em cada pixel individual, conhecendo-se as respostas espectrais  $R_k$  e  $r_{j,k}$  para as  $p$  bandas espectrais e para as  $m$  componentes. Para cada pixel individual, a equação (1) gera, portanto um sistema de  $p$  equações com  $m$  incógnitas, neste caso as frações ocupadas por cada uma das componentes ( $f_j$ ). As frações  $f_j$  em cada pixel individual devem, obviamente, satisfazer as duas condições seguintes:

$$f_j \geq 0 \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m f_j = 1$$

Normalmente o número de bandas espectrais  $k$  é maior do que o número de incógnitas  $p$ , resultando em um sistema de equações lineares em que o número de equações é maior do que o número de incógnitas. Sabidamente, um sistema com estas características não tem uma solução exata, sendo geralmente adotada uma aproximação no sentido de minimizar os erros. Neste contexto, a alternativa mais frequentemente utilizada é aquela fornecida pelo Método dos Mínimos Quadrados, no qual entre as várias possíveis soluções aproximadas se adota aquela que minimiza o somatório dos quadrados dos resíduos  $v_k$ . No presente caso, a solução deve ainda atender as duas restrições em (2). Trata-se, portanto, de uma abordagem de mínimos quadrados com restrições (Shimabukuro & Smith, 1991). Nesta abordagem tradicional do modelo linear de mistura, as respostas espectrais das componentes ( $r_{j,k}$ ), são obtidas ou através dos chamados pixels puros, ou de bibliotecas espectrais ou ainda de medidas em campo ou laboratório. O processo que faz uso de pixels puros, isto é, pixels que são inteiramente ocupados por uma única componente apresenta a vantagem de permitir a estimação das refletâncias espectrais  $r_{j,k}$  diretamente dos próprios dados imagem e por esta razão é o processo mais comumente utilizado na prática. Esta abordagem é normalmente factível, sempre que se tratam de imagem de média ou alta resolução espacial, isto é,

sempre que a área no terreno coberta por um pixel é suficientemente pequena de modo a abranger apenas uma única classe espectral. Esta abordagem, entretanto, torna-se geralmente inviável para imagem de moderada/baixa resolução espacial. Neste caso, a área no terreno coberta por um pixel individual resulta mais extensa, reduzindo a possibilidade de ocorrência de pixels puros nas imagens. Neste estudo, é proposta uma metodologia que tem por objetivo permitir estimar a resposta espectral de componentes em imagens de moderada/baixa resolução espacial, empregando o princípio do modelo linear de mistura espectral.

A metodologia proposta faz uso simultâneo de dois conjuntos de imagens, um de moderada/baixa resolução espacial e um segundo de média resolução espacial. O procedimento consiste em fazer uso do modelo linear de mistura espectral (1) sujeito as restrições (2) em um ajuste utilizando o método dos mínimos quadrados com restrições para estimar as frações das componentes em cada pixel individual. Em se tratando de imagem de média resolução espacial, será normalmente possível encontrar pixels puros para cada uma das componentes e desta forma estimar as refletâncias espectrais das componentes  $r_{j,k}$  conforme é requerido pelo modelo linear de mistura. Uma vez estimadas estas frações, a etapa seguinte consiste em registrar os dois conjuntos de imagens, o que por sua vez permitirá estimar as frações  $f_j$  de cada componente nas imagens de baixa resolução espacial. As respostas espectrais de cada componente podem então ser estimadas, alterando-se o modelo linear (1), isto é, tomando-se como incógnitas as refletâncias espectrais das componentes  $r_{j,k}$  e supondo-se as frações  $f_j$  conhecidas. O modelo linear (1) adquire então a forma:

$$v_{i,k} = R_{i,k} - \sum_{j=1}^m f_{i,j} r_{j,k} \quad (3)$$

Com:

$$k = 1, \dots, p$$

$$i = 1, \dots, n$$

sendo,  $n$  o número de pixels utilizados,  $p$  o número de bandas espectrais,  $m$  o número de componentes,  $R_{i,k}$  a resposta espectral do pixel  $i$  na banda espectral  $k$ ,  $f_{i,j}$  a fração da componente  $j$  no pixel  $i$ , e  $r_{j,k}$  a resposta espectral da componente  $j$  na banda espectral  $k$  (incógnitas).

O modelo (3) é aplicado independentemente para cada uma das bandas espectrais disponíveis nas imagens de baixa resolução espacial, resultando para cada banda um sistema de  $n$  equações lineares com  $m$  incógnitas, com  $n \gg m$ . Para cada banda espectral, as respostas espectrais  $r_{j,k}$  das  $m$  componentes podem ser estimadas resolvendo-se este sistema de  $n$  equações lineares pela abordagem dos mínimos quadrados. Em notação matricial, o sistema (3) pode ser escrito como:

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{R}_k - \mathbf{F} * \mathbf{r}_k \quad (4)$$

Sendo  $\mathbf{V}_k$  um vetor de dimensão  $n$ , contendo os resíduos na banda espectral  $k$ ,  $\mathbf{R}_k$  um vetor de dimensão  $n$  cujos elementos são a resposta espectral, na banda  $k$ , dos pixels utilizados,  $\mathbf{F}$  uma matriz com dimensão  $(n,m)$  cujos elementos são as frações das componentes em cada pixel e  $\mathbf{r}_k$  um vetor de dimensão  $m$  contendo as incógnitas, isto é, a resposta espectral estimada para as componentes.

A solução deste conjunto de  $n$  equações lineares pelo método dos mínimos quadrados é obtida impondo-se a condição de que o somatório dos quadrados dos resíduos em  $\mathbf{V}_k$  seja um mínimo, isto é:

$$\frac{\partial(\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k)}{\partial \mathbf{r}_k} = 0$$

Utilizando-se a equação (4) o somatório dos quadrados dos resíduos  $\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k$  pode ser expresso por:

$$\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k = (\mathbf{R}_k - \mathbf{F} \mathbf{r}_k)' (\mathbf{R}_k - \mathbf{F} \mathbf{r}_k)$$

Expandindo o membro da direita da equação acima, obtêm-se:

$$\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k = \mathbf{R}_k' \mathbf{R}_k - \mathbf{R}_k' \mathbf{F} \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{R}_k + \mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{F} \mathbf{r}_k$$

Observando-se que a parcela  $\mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{R}_k$  é um escalar, isto é, a transposta e idêntica à direta, tem-se que:

$$\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k = \mathbf{R}_k' \mathbf{R}_k - 2 \mathbf{R}_k' \mathbf{F} \mathbf{r}_k + \mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{F} \mathbf{r}_k$$

Minimizando  $\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k$  com respeito às incógnitas  $\mathbf{r}_k$  obtêm-se:

$$\frac{\partial(\mathbf{V}_k' \mathbf{V}_k)}{\partial \mathbf{r}_k} = -2 \mathbf{R}_k' \mathbf{F} + 2 \mathbf{r}_k' \mathbf{F}' \mathbf{F} = 0$$

A solução pelo critério dos mínimos quadrados fica, portanto:

$$\mathbf{r}_k = (\mathbf{F}' \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}' \mathbf{R}_k \quad (5)$$

Na prática ocorre por vezes a presença de pixels ruidosos no conjunto de dados. Estes pixels podem ser detectados por meio da análise dos resíduos em  $\mathbf{V}_k$ . Normalmente estes resíduos podem ser modelados por uma distribuição normal, permitindo desta forma a detecção de pixels com alto resíduo. Estes pixels podem então ser removidos do conjunto de dados e as incógnitas  $\mathbf{r}_k$  novamente estimadas. Na prática, a remoção dos 5% ou 10% dos pixels com mais alto resíduo mostra ser eficiente.

### 3. Experimentos

Para validação da metodologia proposta neste estudo foram utilizadas imagens da mesma data de aquisição (16/07/2004) dos sensores IRMSS (80 m) e WFI (260 m) como dados de moderada resolução espacial e a imagem CCD (20 m) como dados de média resolução espacial. A área de estudo (Figura 1) escolhida para validação da metodologia compreende uma cena no estado de Rondônia, correspondente a órbita ponto 175/110 dos sensores CCD e IRMSS. A imagem do WFI, que engloba a cena destes sensores, mostra o reservatório de Samuel situado próximo à cidade de Porto Velho. Esta região de estudo é representada pela floresta tropical densa com áreas alteradas pela ocupação humana. As rotinas computacionais para o teste da metodologia foram todas implementadas em ambiente MATLAB.

Em uma etapa inicial, o modelo linear de mistura espectral (1) juntamente com as restrições (2) foi aplicado às imagens de média resolução espacial (CCD), empregando-se a abordagem de pixels puros, e gerando desta forma imagens de fração para cada uma das três componentes. Nesta etapa foram utilizadas as bandas do espectro verde (0,52 - 0,59  $\mu\text{m}$ ), vermelho (0,63 - 0,69  $\mu\text{m}$ ), infravermelho próximo (0,77 - 0,89  $\mu\text{m}$ ) da câmara CCD. A segunda etapa consiste na estimação das frações das componentes, para pixels nas imagens de moderada resolução espacial (IRMSS e WFI). As imagens coletadas pelos três sistemas sensores a bordo da plataforma CBERS-2 foram co-registradas entre si através de polinômio de primeiro grau (erro médio < 0,5 pixels). Este procedimento permite calcular as frações das componentes para pixels de moderada resolução espacial (IRMSS e WFI) a partir das imagens fração estimadas na etapa anterior, para pixels de média resolução espacial (CCD). A terceira etapa consiste na aplicação do modelo (5) aos dados de moderada resolução espacial (IRMSS e WFI) e conseqüente estimação das refletâncias espectrais para os dados destes dois sistemas sensores. Os valores estimados para as refletâncias espectrais para os sistemas IRMSS e WFI, bem como a descrição espectral das bandas estão apresentados na Tabela 1.

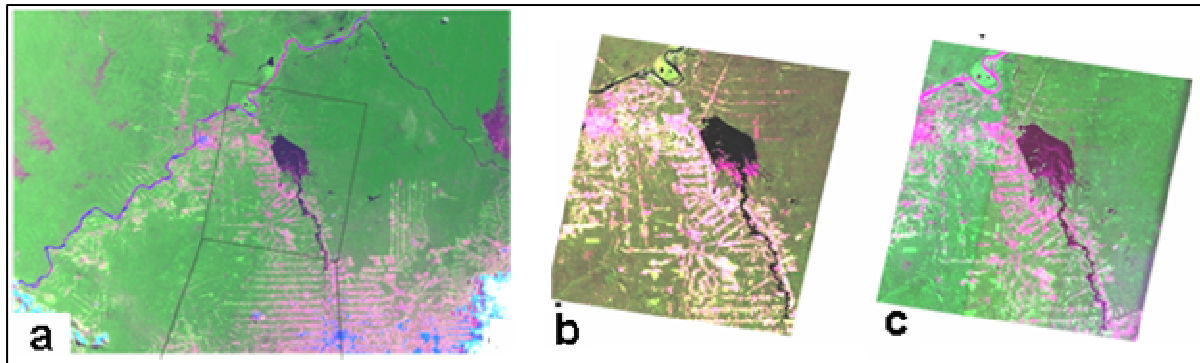


Figura. 1 - Composição colorida (RGB) da área de estudo: (a) imagem WFI (R1 G2 B1); (b) IRMSS (R3 G1 B2); e (c) CCD (R2 G3 B1) da plataforma CBERS-2. (16/07/2004)

Tabela 1 – Resposta espectral dos pixel puros estimados em ND (8 bits) normalizado.

	Banda	Solo	Sombra	Vegetação
IRMSS	PAN (0,50 - 1,10 $\mu\text{m}$ )	0,41	0,11	0,39
	IVM 1 (1,55 - 1,75 $\mu\text{m}$ )	0,54	0,03	0,25
	IVM 2 (2,08 - 2,35 $\mu\text{m}$ )	0,30	0,01	0,09
WFI	Vermelho (0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ )	0,34	0,19	0,22
	IVP (0,77 - 0,89 $\mu\text{m}$ )	0,45	0,12	0,51

Os valores estimados para as refletâncias espectrais foram avaliados de duas maneiras: (1) analisando o diagrama de dispersão envolvendo valores de refletância espectral para pixels nas imagens coletadas pelos sensores IRMSS e WFI (**Figura 2**) e (2) comparando a estatística básica entre 3 classes geradas por um classificador não paramétrico (k-means).

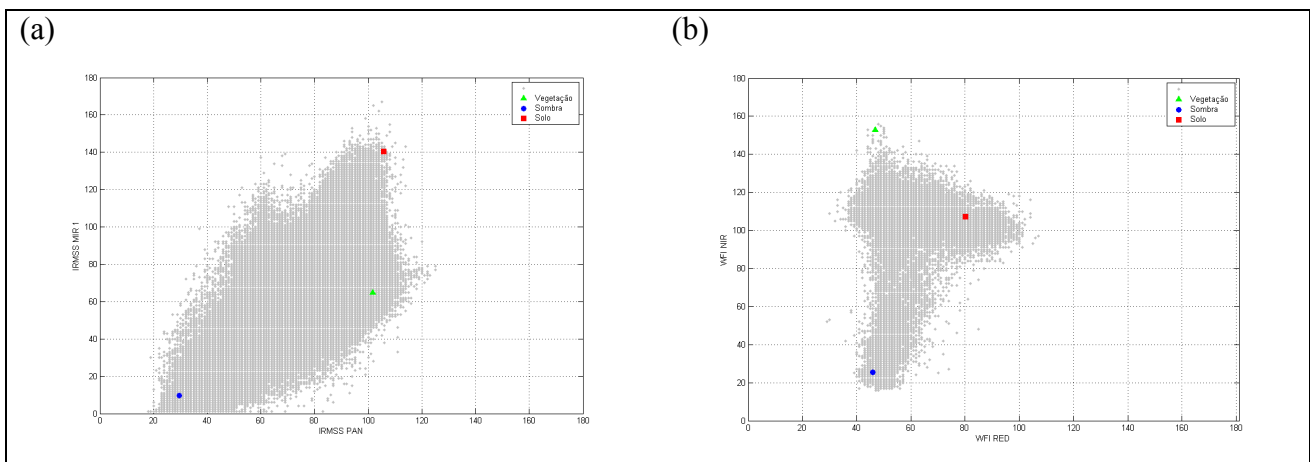


Fig. 2 - Diagrama de dispersão para os dados fornecidos pelo sensor IRMSS (a) e WFI (b). Observa-se que as respostas espectrais (ND 8 bits) estimadas para as componentes estão localizadas corretamente próximas aos vértices.

No primeiro caso, os dados da imagem devem estar localizados dentro do simplex, enquanto que os pontos associados às três componentes devem estar localizados nos vértices do simplex. Nesse estudo, o diagrama de dispersão envolvendo as bandas espectrais do visível e infravermelho próximo (PAN) e do infravermelho médio é apresentado na **Figura 2-a** para os dados do sensor IRMSS. De maneira similar, o diagrama de dispersão envolvendo as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo é apresentado na **Figura 2-b** para os dados do sensor WFI. Pode-se observar que em ambos os casos, a posição ocupada pelas três componentes aproxima-se bastante daquela teoricamente correta, sugerindo assim que um razoável grau de exatidão foi atingido pelo

modelo proposto (5), ao estimar os valores para a refletância espectral das componentes nas bandas espectrais dos sensores IRMSS e WFI.

A avaliação da metodologia proposta foi também realizada comparando as imagens fração produzidas pelo modelo linear de mistura espectral (1), quando aplicado às imagens geradas pelos três sistemas sensores a bordo da plataforma CBERS-2. No caso dos dados em média resolução espacial (CCD), as respostas espectrais das três componentes, conforme requerido pelo modelo (1), foram estimadas utilizando a técnica dos pixels puros. No caso dos dados fornecidos pelos sensores de moderada resolução espacial (IRMSS e WFI) foram utilizadas as respostas espectrais produzidas pelo modelo proposto (5). A **Figura 3** apresenta a composição colorida das imagens fração vegetação, solo e sombra derivadas dos sensores CCD (3-a), IRMSS(3-b) e WFI (3-c). Como pode ser observado, as imagens fração derivadas desses sensores são muito semelhantes. Para a avaliação quantitativa dos valores médios, para cada sensor gerou-se uma imagem classificada com três classes típicas e contrastantes da área de estudo Floresta, Hidrografia e Desflorestamento. A **Figura 4** apresenta as imagens classificadas para os sensores CCD (4-a), IRMSS(4-b) e WFI (4-c).

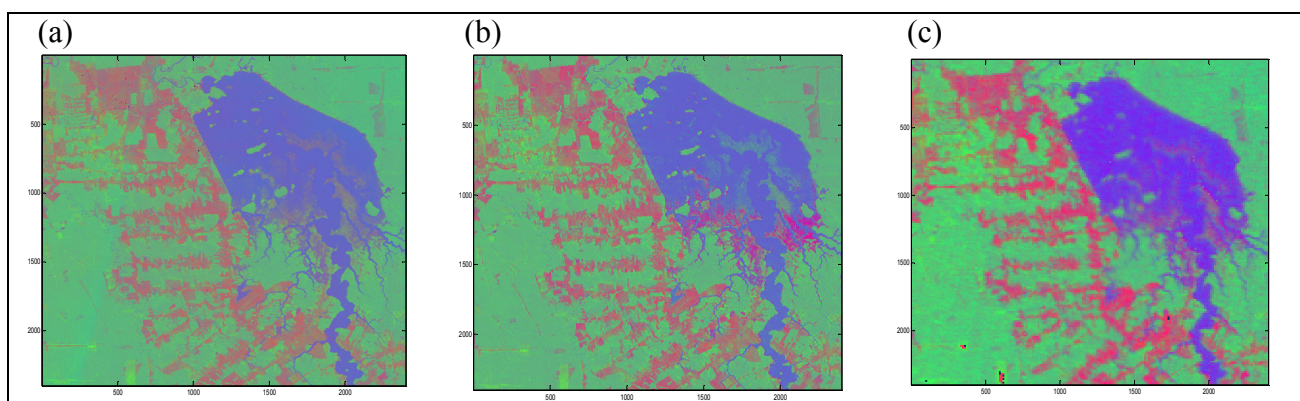


Figura. 3 – Composição colorida das imagens fração R-Solo,G-Vegetação,B-Sombra. CCD (a), IRMSS(b) e WFI(c).

A **Figura 5** apresenta a porcentagem de área classificada para cada sensor. Embora as áreas sejam próximas, isso não significa a boa qualidade da classificação como pode ser observado na parte esquerda superior da imagem (4-b) que apresenta discrepância em relação às demais. Outro dado interessante apresentado é a tendência dos dados WFI superestimarem as áreas de floresta, isso pode ser explicado pela fragmentação do desmatamento da área de estudo, em que pequenos desflorestamentos não serão detectados por este sensor. Ressalta-se que o objetivo deste trabalho não é comparar as classificações entre os sensores, e sim através das classificações obter agrupamentos representativos de áreas contrastantes de solo, sombra e vegetação.

A **Figura 6** mostra os valores médios das imagens frações para diferentes classes de cobertura. Analisando a figura é possível observar que as maiores variância conforme esperado está associada aos dados de melhor resolução espacial (CCD). As maiores diferenças entre as médias ocorrem para classe desflorestamento, em que os valores da imagem de melhor resolução espacial apresentam as maiores discrepâncias, isto pode ser explicado por se tratar da classe mais heterogênea. Isto também sugere que pixels claros, ou seja, com valores de reflectância maiores não apresentam comportamento linear nas diferentes resoluções espaciais estudadas. No geral é possível observar a consistência da metodologia entre os sensores, uma vez que as médias são semelhantes entre si.

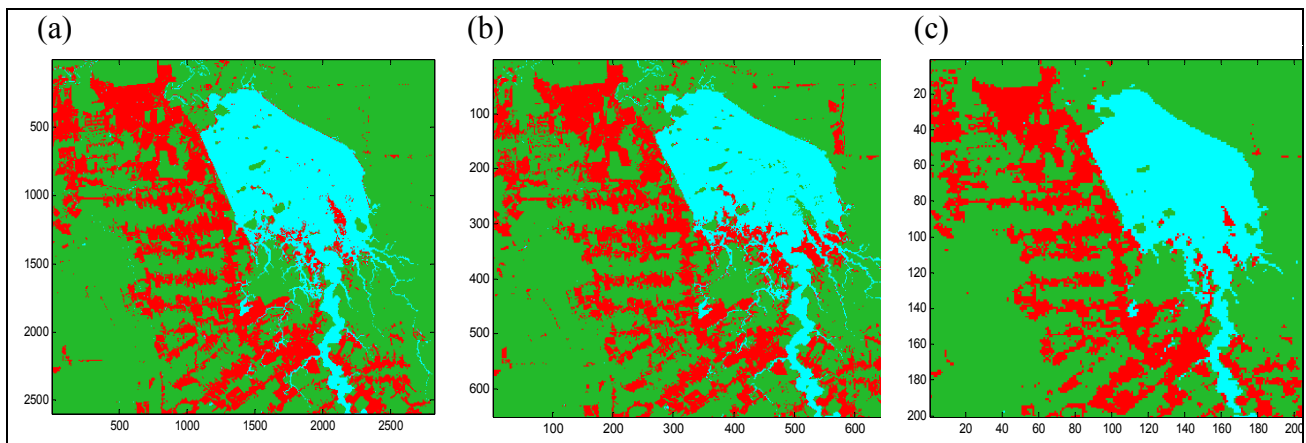


Fig. 4 – Classificação do algoritmo K-médias, 3 agrupamentos Hidrografia (azul), Desflorestamento (vermelho) e Floresta (verde). CCD (a), IRMSS(b) e WFI(c).

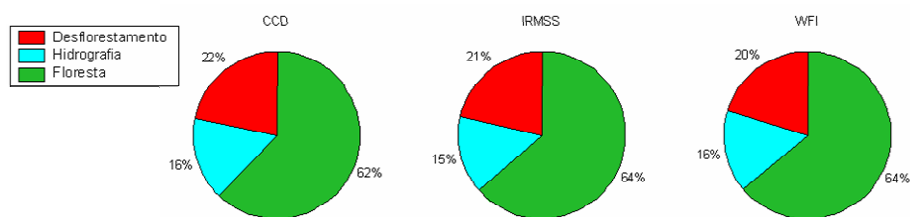


Figura 5 – Percentagem de área classificada por classe. Área total: 2.907 km<sup>2</sup>

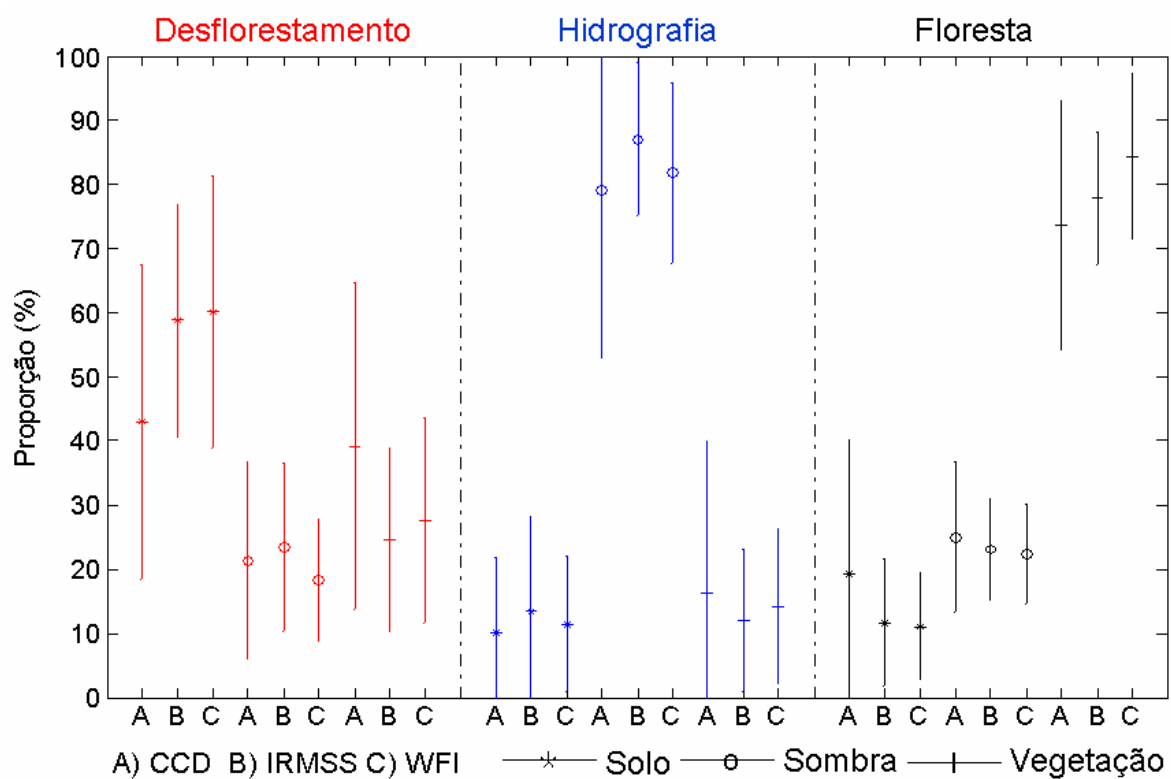


Figura 6 – Média e Desvio Padrão das proporções dos componentes nos pixels dos sensores do CBERS-2.

#### 4. Conclusões

O estudo avaliou a abordagem para estimar as respostas espectrais dos componentes no problema de mistura espectral, em imagens de resolução espacial moderada. A utilização de imagens obtidas pelos sensores a bordo do satélite CBERS-2 foram fundamentais para o teste da metodologia, pois foi possível a aquisição de imagens de mesma data, nas mesmas condições de iluminação e geometria de imageamento. No diagrama de dispersão, os valores estimados para as respostas espectrais dos componentes localizam-se próximos aos vértices do simplex formado pelos dados das imagens, demonstrando a confiabilidade do método proposto. A utilização de 3 classes contrastantes de cobertura da terra permitiu identificar as maiores discrepâncias entre as imagens fração produzidas utilizando os dados do IRMSS e WFI e que as respostas espectrais estimadas para os componentes são similares aos das derivadas dos dados do sensor CCD, que empregou a técnica tradicional da escolha do pixel puro. A avaliação da metodologia confirma sua potencialidade de utilizar dados numa escala local (i.e. CCD) e utilizá-los como entrada para um modelo em escala regional (i.e. WFI).

#### Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela disponibilidade das imagens CBERS 2 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq processo 132140/2005-5.

#### Referências

- Adams, J. B., Sabol, D. E., Kapos, V., Almeida-Filho, R., Roberts, D. A., Smith, M. O., Gillespie, A. R., **Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon**. Remote Sensing of Environment, vol. 52, pp. 137-152, 1995.
- Berman, M., Kiiveri, H., Lagerstrom, R., Ernst, A., Dunne, R., and Huntington, F. **ICE: a statistical approach to identifying endmembers in hyperspectral images**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, No. 10, pp. 2085-2095, 2004.
- Bowles, J., Palmadesso, P., Antoniadis, J., Baumbach, M. **Use of filter vectors in hyperspectral data analysis**. Proceedings of SPIE, vol. 2553, pp. 148-157, 1995.
- Carreiras, J.M.B., Shimabukuro, Y.E., Pereira, J.M.C. **Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil**. International Journal of Remote Sensing, vol. 23, No. 23, pp. 4979-4983, 2002.
- Haertel, V., Shimabukuro, Y. E., Almeida-Filho, R. **Fraction images in multitemporal change detection**. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, No. 23, pp. 5473-5489, 2004.
- Hlavka, C. and Spanner, M. **Unmixing AVHRR imagery to assess clearcuts in forest regrowth in Oregon**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, No. 3, pp. 788-795, 1995.
- 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, No.11, p.2231-2240, July 1993.
- Price, J. J. **Combining Multispectral Data of Different Spatial Resolution**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, No. 3, pp. 1199-1203, 1999.
- Shimabukuro Y.E. and 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, vol.29, No. 1, pp. 16-20, 1991.
- Stein, W. J. **Normal composition models: generalizations and applications**. Proceedings of SPIE, vol. 4725, pp. 216-224, 2002.
- Wang, F. **Fuzzy supervised classification of remote sensing images**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, No. 2, 1990.