

# Validação do modelo linear de mistura espectral em imagens ASTER/TERRA a partir de dados IKONOS

Claudio Gelelete<sup>1</sup>  
João Roberto dos Santos<sup>2</sup>  
Yosio Edemir Shimabukuro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Militar de Engenharia - IME  
Pça Gen Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha, Rio de Janeiro - RJ, Brasil  
cgelelete@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Av dos Astronautas, 1758 – Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, Brasil  
{jroberto, yosio}@itd.inpe.br

**Abstract:** The objective of this work is to develop a methodological approach to the joint ASTER/TERRA and IKONOS data, considering the application of a Linear Spectral Mixture Model. The fundamental idea is to verify the possibility to improve the spectral mixture model results derived from a medium spatial resolution images (e.g. ASTER), utilizing high-resolution data (IKONOS), that allows the characterization and estimation of pure pixels for model formulation. Then the proportions of soil, shade and vegetation components originated from IKONOS scenes were utilized as the input data to the computer program developed, in order to estimate the most pure pixels for ASTER and consequently to refine the performance of the mixture model for ASTER images. The validation of ASTER results originated from this method was performed using linear regression analysis.

**Palavras-chave:** modelo de mistura espectral, processamento de imagens, ASTER, IKONOS.

## 1. Introdução

O crescente desenvolvimento de novas tecnologias em sensoriamento remoto tem aumentado a quantidade e a qualidade das informações para os mais variados campos do conhecimento técnico-científico. Este desenvolvimento conta hoje com sensores de alta resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal permitindo assim fazer observações da superfície terrestre e da dinâmica que a envolve com maior eficácia. Como todas estas características não são encontradas em um único sensor, observa-se uma tendência na integração de dados multisensores em trabalhos científicos com o objetivo de explorar as características que cada sensor pode oferecer e, desta forma, obter-se um conjunto de dados que melhor caracterize a região e os fenômenos envolvidos.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um algoritmo capaz de melhorar o resultado do modelo de mistura espectral para imagens ASTER utilizando as imagens IKONOS na obtenção de curvas espectrais que melhor representam os alvos primários nas cenas, gerando um procedimento metodológico para integrar os dados multisensores e avaliando seu desempenho.

## 2. Área de Estudo

A área de estudo está inserida no município de Sinop, parte norte do Estado do Mato Grosso, na região centro-oeste do Brasil, entre as coordenadas 11°22'49.66" a 11°26'39.04" de latitude sul e 55°17'32.83" a 55°21'24.86" de longitude oeste. A área está situada ao longo de um trecho da rodovia BR-163 Cuiabá-Santarém e compreende uma área aproximada de 50Km<sup>2</sup>.

### **3. Material Utilizado**

Foram utilizadas duas cenas ASTER sequenciais (AST\_L1B.003:2007400881 e AST\_L1B.003:2007400878) adquiridas em 21 de abril de 2002, com 8 bandas, e uma cena IKONOS da mesma área, com 4 bandas espectrais, adquirida em 19 de maio de 2001.

Os softwares utilizados foram: SPRING para processar os modelos de mistura, ACORN para a correção atmosférica das imagens ASTER, ATCOR para a correção atmosférica das cenas IKONOS, IDL para a programação e ENVI para todos os demais processamentos digitais. Uma planilha eletrônica Excel foi utilizada para gerar os gráficos.

### **4. Metodologia**

Para que se pudesse trabalhar com as cenas dos dois sensores em conjunto foi necessário uma cuidadosa etapa de pré-processamento. As imagens foram corrigidas atmosféricamente, sofreram uma transformação de 16 para 8 bits e finalmente registradas com precisão.

#### **4.1. Correção Atmosférica**

Na correção atmosférica objetiva-se retirar a influência atmosférica da imagem, subtraindo os efeitos causados pelos fenômenos da absorção e do espalhamento, permitindo-se trabalhar com grandezas radiométricas como a reflectância de superfície que retrata da melhor forma a resposta dos alvos, já que a reflectância é uma propriedade destes.

Quando e como corrigir os efeitos atmosféricos dependerá do sensor, dos dados atmosféricos disponíveis, da informação desejada e do método usado para extrair as informações. Em algumas aplicações este tipo de tratamento da imagem não se torna necessário, porém em outras circunstâncias, correções são exigidas para colocar dados multi-temporais na mesma escala radiométrica, na utilização de dados para a integração multisensor, trabalhos que envolvam matemática de bandas (Lu *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2001) e relacionar dados obtidos por sensores remotos com parâmetros biofísicos (Chuvieco, 1996).

Para a correção atmosférica das imagens ASTER foi utilizado o software ACORN e, para a imagem IKONOS, o software ATCOR. Apesar de ser o ideal, não foi possível dispor de um único programa que realizasse a correção atmosférica nas imagens dos dois sensores. Ao final da correção obteve-se imagens reflectância de suporte com 16 bits.

#### **4.2. Registro das Imagens**

Para registrar imagens com diferentes resoluções utiliza-se a imagem de melhor resolução espacial como base, já que esta cena possui uma informação espacial mais precisa, porém na realização do registro entre imagens com diferentes resoluções espaciais a precisão alcançada será relativa à imagem de pior resolução espacial.

Assim, utilizou-se a cena IKONOS como base e o registro foi aplicado sobre as bandas de 15m do sensor ASTER que ditaram a precisão final da operação. Pode-se dizer que esta precisão se repete para as bandas ASTER com 30m (SWIR), pois estas são perfeitamente registradas com as bandas de 15m (VNIR). Para a reamostragem foi utilizado o método do vizinho mais próximo para garantir a máxima fidelidade radiométrica. No fim do processo as duas imagens ficaram com pixels equivalentes a 1m no terreno.

#### **4.3. Mosaico das Cenas ASTER**

A área de estudo está dividida em duas cenas ASTER. Por isso, após o registro das cenas, as duas foram mosaicadas e o mosaico final foi recortado de forma a ficar exatamente do mesmo

tamanho da imagem IKONOS, ou seja, com o mesmo número de linhas e colunas e, conseqüentemente, com o mesmo número de pixels.

#### 4.4. Transformação para 8 Bits

Como o SPRING só processa imagens de 8 bits as imagens reflectância, originalmente com 16 bits, precisam ter sua resolução radiométrica reduzida. Optou-se por dividir os valores dos pixels por 800, para a imagem IKONOS, e por 5.000, para o mosaico ASTER, (valores máximos encontrados na banda do infravermelho próximo para as imagens reflectância) e não pelo total de 65.536 referentes aos 16 bits, para depois multiplicar por 255. Desta forma foi possível assegurar o mínimo de perda de informação.

#### 5. Modelo Linear de Mistura Espectral

Modelos de mistura espectral são utilizados para modelar a influência da resposta característica de alvos puros no valor radiométrico de cada pixel, já que este valor possui informações sobre a proporção da mistura entre cada componente puro. Assim, a resolução espacial do sensor utilizado determina a variedade de alvos que cada pixel irá abranger em sua resposta.

Shimabukuro (1987) indica os componentes vegetação, solo e sombra como constituintes básicos de cenas florestadas, e descreve o modelo de mistura espectral pela seguinte equação:

$$d_{i,j,k} = a_{i,j} \times \text{veget}_k + b_{i,j} \times \text{solok} + c_{i,j} \times \text{sombra}_k + e_{i,j,k}; \text{ onde:}$$

$d$  = resposta do pixel  $i,j$  na banda  $k$ ;

$a$ ,  $b$  e  $c$  = proporções de vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente;

$\text{veget}$ ,  $\text{solo}$  e  $\text{sombra}$  = respostas espectrais de pixels puros;

$e$  = termo residual, expressa a diferença entre a reflectância do pixel observado “ $d$ ” e a reflectância do pixel computado a partir do modelo.

#### 6. Estudo do Problema

Na aplicação direta do modelo de mistura espectral o que se deseja obter são as proporções  $a_{i,j}$ ,  $b_{i,j}$  e  $c_{i,j}$ ; sendo fornecido para o sistema os valores de  $d_{i,j,k}$ ,  $\text{veget}_k$ ,  $\text{solok}$  e  $\text{sombra}_k$ .

A dificuldade na aplicação do modelo de mistura é a determinação das curvas espectrais dos componentes puros, pois dificilmente se encontra um pixel que contenha exclusivamente a resposta do elemento desejado, já que a área enquadrada pelo IFOV fatalmente conterá a resposta espectral de outros elementos. A questão prática é encontrar pixels cujas influências destes elementos indesejados, para a determinação do pixel puro, seja a menor possível. Quanto maior a área no terreno enquadrada pelo IFOV, maior a quantidade de alvos representados e conseqüentemente, maior a mistura de respostas. Se o IFOV for menor, a probabilidade de se encontrar um pixel com respostas mais puras é maior e, conseqüentemente, as proporções geradas como resultado do modelo provavelmente serão mais precisas.

Inicialmente pode-se pensar em utilizar a resposta espectral obtida por um sensor de melhor resolução espacial para melhorar o resultado do modelo de mistura de um sensor de menor resolução espacial. Contudo, na prática, as respostas obtidas são influenciadas pelas características de cada sensor o que faz com que as respostas não sejam iguais, mesmo quando se trata de imagens reflectância. Este fato causaria erros no resultado final.

Uma alternativa possível é a utilização das proporções obtidas pelo modelo de mistura de sensores de alta resolução espacial para inferir as curvas espectrais características dos pixels puros em sensores de menor resolução espacial. Considerando os fundamentos citados em

Shimabukuro e Smith (1995), definiu-se para a geração dessas curvas espectrais a seguinte seqüência:

a) aplicação do modelo de mistura para os dados obtidos do sensor IKONOS, obtendo-se as proporções de solo, sombra e vegetação para cada pixel da imagem através das imagens-fração. Na formulação verifica-se em (1)  $\rightarrow d_{i,j,k} = a_{i,j} \times \text{veget}_k + b_{i,j} \times \text{solok} + c_{i,j} \times \text{sombrak}$ ; onde as variáveis em azul são conhecidas e as variáveis em vermelho são as incógnitas. Assim são fornecidas as cenas IKONOS multi ( $d_{i,j,k}$ ) e as respostas espectrais dos três elementos primários ( $\text{veget}_k$ ,  $\text{solok}$  e  $\text{sombrak}$ ) retiradas das cenas IKONOS; obtém-se então as proporções ( $a_{i,j}$ ,  $b_{i,j}$  e  $c_{i,j}$ ), na forma de imagens-fração, relativas a cada elemento primário de cada pixel.

b) a partir dessas proporções derivadas da imagem IKONOS, aplicam-se tais valores na mesma formulação, agora com a cena ASTER, ficando a equação assim constituída: (2)  $d_{i,j,k} = a_{i,j} \times \text{veget}_k + b_{i,j} \times \text{solok} + c_{i,j} \times \text{sombrak}$ ; onde as variáveis em azul são conhecidas e as variáveis em vermelho são as incógnitas. Desta forma são fornecidas as proporções (imagens-fração) obtidas em a) com as cenas IKONOS ( $a_{i,j}$ ,  $b_{i,j}$  e  $c_{i,j}$ ) e as cenas ASTER ( $d_{i,j,k}$ ), sendo obtidas as novas respostas espectrais ( $\text{veget}_k$ ,  $\text{solok}$  e  $\text{sombrak}$ ) de cada elemento primário. Nesse ponto é importante perceber que a equação (2) se desenvolve em um sistema de equações sobredeterminado para cada banda de forma independente, ou seja, se for considerado uma única banda ( $k=1$ ) pode-se eliminar  $k$  e o sistema pode ser escrito da seguinte forma: (3)  $d_{m,n} = a_{m,n} \times \text{veget} + b_{m,n} \times \text{solo} + c_{m,n} \times \text{sombra}$ ; onde se observa 3 incógnitas e  $m \times n$  equações (número total de pixels da cena). Este sistema se repete para cada banda, caso a imagem seja multiespectral.

c) por fim, de posse das novas respostas espectrais estimadas para o sensor de menor resolução espacial (ASTER) e da imagem original ASTER obtém-se as novas imagens-fração. Neste caso repete-se a equação do item a).

## 7. Desenvolvimento Matemático

A formulação original do modelo de mistura implementado no SPRING e em outros *softwares* resolve a equação característica do modelo de mistura espectral, conforme a forma exposta no item a) e, conseqüentemente, no item c), ou seja, tendo como incógnitas as proporções. Para que o processo possa ser integralmente realizado fica a pendência da resolução da equação característica do modelo de mistura como exposto no item b), ou seja, com as respostas espectrais como incógnitas.

Da formulação original  $d_{k,i,j} = a_{i,j} \times \text{veget}_k + b_{i,j} \times \text{solok} + c_{i,j} \times \text{sombrak}$ ; pode-se transformar as dimensões  $i$  e  $j$  em uma única dimensão  $m$  sem nenhum tipo de perda, transformando-se um arquivo bidimensional em unidimensional, porém com todas as informações originais, apenas dispostas de forma diferente. A formulação original passa a ter a seguinte forma: (4)  $d_{k,m} = a_m \times \text{veget}_k + b_m \times \text{solok} + c_m \times \text{sombrak}$ .

Para escrever toda a equação na forma matricial, podemos substituir as proporções  $a_m$ ,  $b_m$  e  $c_m$  por  $P_{3,m}$  e as respostas espectrais  $\text{veget}_k$ ,  $\text{solok}$  e  $\text{sombrak}$  por  $R_{k,3}$ . A equação então passa a ter a forma: (5)  $D_{k,m} = R_{k,3} \times P_{3,m}$ .

Resolvendo o sistema banda a banda, ou seja, fazendo  $k = 1$ , então: (6)  $D_{1,m} = R_{1,3} \times P_{3,m}$ .

Como o que se deseja encontrar são os valores que compõem a matriz de respostas espectrais  $R$ , então reescreve-se a equação (6) como: (7)  $R_{1,3} = D_{1,m} \times P_{m,3}^T \times (P_{3,m} \times P_{m,3}^T)^{-1}$ ; onde  $R$  é uma matriz que contém os valores das respostas espectrais para uma determinada banda dos elementos solo, sombra e vegetação.

## 8. Entrada de Dados

A resolução espacial das duas imagens foi passada para 15m, resolução original das bandas ASTER de 1 a 3, para que um mesmo pixel ASTER não tenha mais que uma correspondência com pixels IKONOS. Para isso foi criado um filtro objetivando-se utilizar blocos de 15x15 pixels da imagem de 1m de resolução, calcular a média destes 225 pixels e gerar um pixel de 15m com o valor obtido para a nova imagem.

Foram testadas diversas possibilidades para a entrada de dados no programa desenvolvido para a realização dos cálculos. Como as duas imagens foram recortadas exatamente do mesmo tamanho, mesmo número de linhas e colunas, decidiu-se que apenas alguns pixels seriam utilizados para alimentar o sistema. Estes pixels deveriam ser selecionados em áreas de solo exposto; de sombra, ou de água; e de vegetação; e deveriam apresentar como respostas das 8 bandas ASTER uma curva espectral bem característica dos alvos que eles representam.

Desta forma, um pixel localizado em área de floresta deve apresentar como resposta das bandas ASTER uma curva próxima à curva característica de vegetação sadia e nas imagens-fração uma resposta alta na imagem-fração vegetação e sombra e uma resposta mais baixa na imagem-fração solo, e assim por diante.

## 9. Resultados

De acordo com a metodologia adotada, o primeiro passo foi a aplicação do modelo de mistura espectral nas imagens IKONOS, utilizando-se as quatro bandas. Para isso foram escolhidos três pixels na imagem como elementos primários. Como resultado do modelo de mistura espectral foram geradas três imagens-fração e quatro imagens-erro.

Após a obtenção das imagens-fração, o programa para estimar os valores dos pixels puros a serem aplicados nas imagens ASTER foi executado 8 vezes, sendo uma para cada banda. Os resultados obtidos foram inseridos em uma planilha EXCEL e os três valores espectrais relativos a cada uma das oito bandas ASTER foram plotados gerando assim as curvas espectrais de cada elemento primário (**Figura 1**).

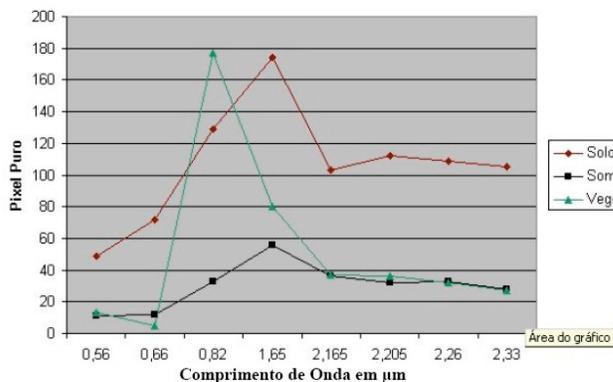


Figura 1. Pixels puros obtidos.

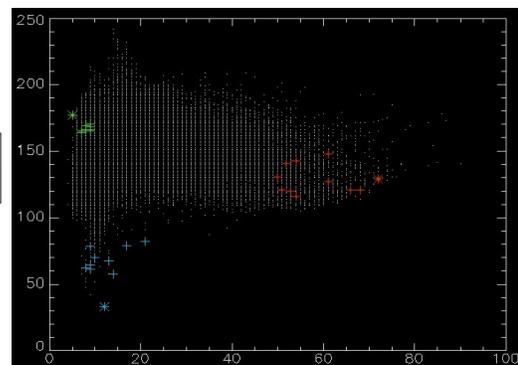


Figura 2. Scattergrama

As curvas de solo e vegetação obtidas apresentam sua forma característica, inclusive no que diz respeito a proporção entre elas. A curva de sombra apresenta aumento dos valores de reflectância conforme aumento do comprimento de onda até atingir um pico no infravermelho médio decaindo nos comprimentos de onda seguintes. Esta resposta indesejada para a curva de sombra provavelmente se deve a contaminação dos pixels de água por vegetação e solo, já que na área de estudo na imagem ASTER não há pixels de 15m que se encontrem completamente localizados dentro de uma superfície aquosa.

A localização dos pixels puros estimados em relação aos demais pixels da imagem está representada no scattergrama (**Figura 2**), onde as cruzes representam os pixels que serviram

de dados de entrada para o programa, os asteriscos representam os pixels puros estimados e os pontos brancos, os demais pixels da imagem. Pode-se perceber que os pixels puros estimados se localizam de forma mais externa em relação aos pixels que serviram como dados de entrada, o que se constitui como objetivo do programa.

Após ter obtido as novas curvas de reflectância com o programa implementado, estas foram aplicadas na obtenção do modelo de mistura para o mosaico de imagens ASTER. A **Figura 3** mostra os resultados obtidos para as imagens fração.

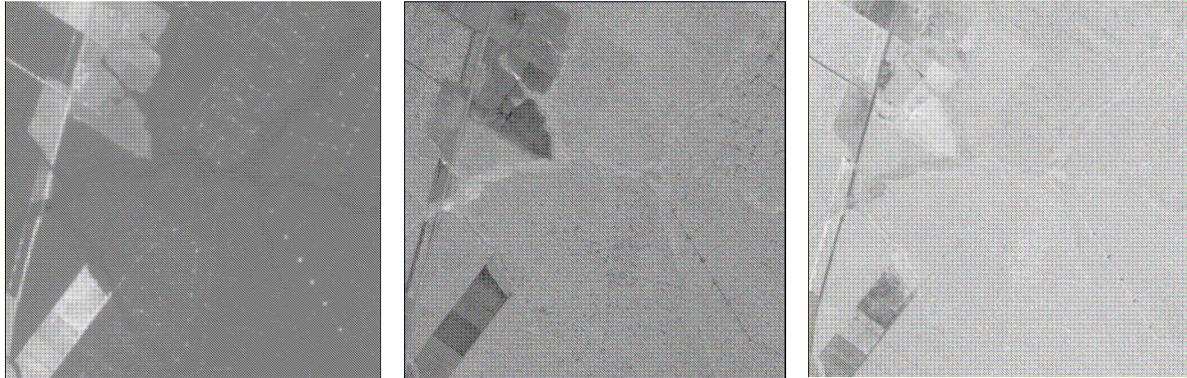


Figura 3. Imagens-fração solo, sombra e vegetação

Para medir a correlação entre as imagens-fração obtidas com os dois sensores, foram realizadas regressões lineares entre as respectivas imagens-fração solo, sombra e vegetação. No intuito de evitar correlação espacial, não foram utilizados todos os pixels das imagens. Os pixels foram escolhidos de duas formas: a primeira aleatória e espaçados igualmente por toda a imagem, sendo escolhidos 700 pixels em cada imagem-fração para integrarem a regressão linear. Na segunda os pixels foram escolhidos de acordo com o resultado da soma das porcentagens de cada elemento primário, de forma que cada pixel apresentasse soma igual ou superior a 98% nas imagens fração. Estes pixels não poderiam estar a menos de quatro linhas e quatro colunas de outro pixel selecionado. Neste caso, pouco mais de 200 pixels foram selecionados para a realização das regressões, cujos resultados estão apresentados nas **Figuras 4 e 5**.

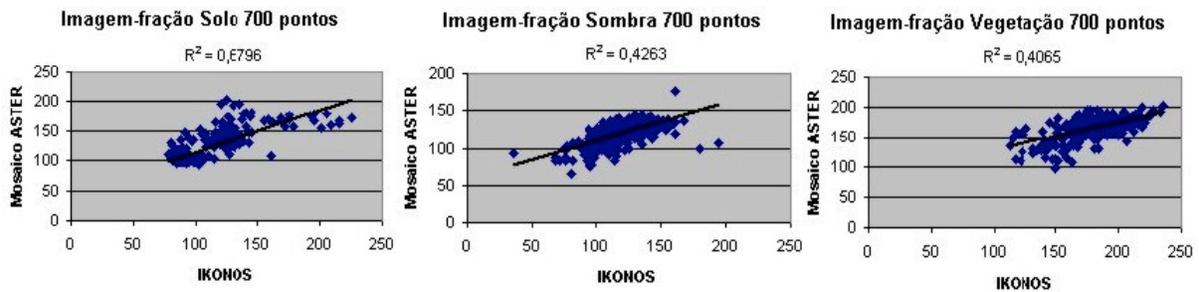


Figura 4. Resultado da regressão linear para 700 pixels

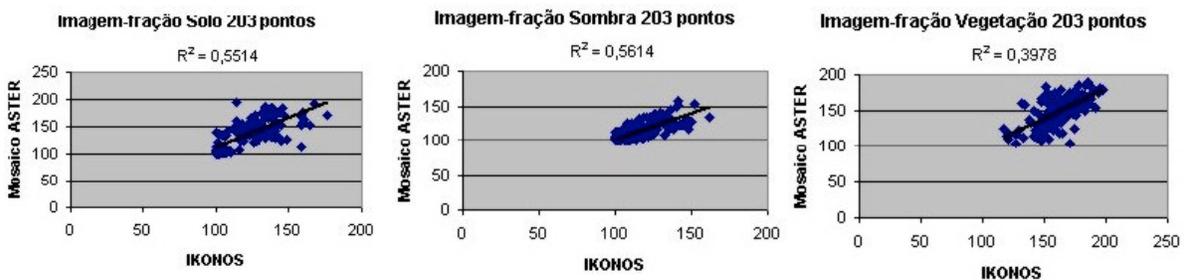


Figura 5. Resultado da regressão linear para 203 pixels

O valor de  $R^2$  exprime a correlação existente entre os valores estimados pela equação de regressão aplicados aos valores encontrados em uma imagem e os valores reais encontrados na outra imagem, determinando assim a correlação entre elas. O resultado deve variar entre 0 e 1, sendo que o valor 1 significa que a equação de regressão estabelecida é capaz de estimar com precisão os valores da outra imagem e 0 que tal correlação não pode ser estabelecida. Os valores obtidos se encontraram numa faixa mediana onde não apontam com clareza nem para um alto grau de correlação, nem para a falta desta, ou seja, uma fraca correlação entre as duas amostras, sendo que os piores resultados foram encontrados para a fração vegetação e o melhor para a fração solo.

## 10. Conclusões

A correção atmosférica foi realizada por algoritmos diferentes, cujas formulações e parâmetros utilizados para os cálculos diferem entre si. A reflectância de superfície é um valor que, teoricamente, depende apenas dos alvos envolvidos. Contudo, os valores encontrados nas duas imagens reflectância apresentaram diferenças relevantes, inclusive na média e variância dos valores para a área de floresta, onde não ocorrem grandes mudanças ao longo do tempo considerado. Não existe algoritmo de correção atmosférica perfeito, podendo-se considerar que boa parte da diferença obtida entre os valores dos pixels nas duas imagens foi ocasionada pelo fato das correções atmosféricas terem sido realizadas por algoritmos distintos e considerando parâmetros que não foram quantificados nas duas imagens por imposição dos programas de correção atmosférica.

A reamostragem da imagem (para uma resolução espacial em que cada pixel englobe uma área maior no terreno) através de um filtro que calcule a média aritmética dos valores dos pixels originais envolvidos e atribua este resultado ao valor radiométrico do pixel criado, atinge um resultado mais fiel do que se realizado com método do vizinho mais próximo, que pode ignorar alguns valores originais, e, também mais fiel, do que os resultados obtidos com métodos que suavizam as altas frequências das imagens. Isto pode ser verificado matematicamente com facilidade.

As imagens ASTER e IKONOS foram adquiridas com certo nível de georreferenciamento e corrigidas radiometricamente. Para isso ambas foram reamostradas pelo método de convolução cúbica, que suaviza os valores radiométricos dos pixels, ou seja, modifica a radiometria em relação à imagem original. Esta modificação é facilmente observada ao serem comparados aos valores radiométricos (DN) de um mesmo pixel na área de sobreposição das duas cenas ASTER. Como as imagens são contínuas, este pixel foi detectado apenas uma única vez, apesar de aparecer nas duas cenas com valores radiométricos diferentes. Esta modificação da radiometria é indesejada, influenciando de forma negativa os resultados.

A solução matemática encontrada para a estimação dos novos valores radiométricos dos pixels puros pode ser aplicada para qualquer conjunto de dois sensores. Matematicamente a solução só não existiria para imagens de sensores cujo número de pixels seja menor que a quantidade de bandas, o que mesmo considerando sensores hiperespectrais é pouco provável de ocorrer.

Verifica-se que, de um modo geral, as feições encontradas nas imagens IKONOS e imagens-fração originárias destas, apesar de estarem reamostradas para 15m, igualando-se às imagens ASTER, apresentam uma textura diferente, ressaltando as altas frequências da imagem, dando a impressão de maior detalhamento. Isto faz com que vários pixels de valores radiométricos semelhantes, por formarem um mesmo alvo na imagem ASTER e respectivas imagens-fração, se correlacionem com seus homólogos (IKONOS) de valores radiométricos que apresentam maior diferença entre si. Este fato degrada o resultado da correlação espacial

esperada entre as imagens e a acurácia dos cálculos para a estimação dos novos valores radiométricos dos pixels puros a serem utilizados na imagem ASTER.

As proporções dos componentes solo, sombra e vegetação obtidos nas cenas IKONOS possibilitam a estimação de pixels ASTER mais puros, e estes, por sua vez, utilizados no modelo de mistura espectral, proporcionam uma melhoria em seu resultado.

Os resultados obtidos com as regressões lineares entre as imagens-fração mostram valores que indicam fraca correlação entre elas. Além das considerações anteriores, outros motivos levantados para esta baixa correlação são:

a) a diferença entre a data de aquisição das imagens ASTER e IKONOS ter sido de aproximadamente 1 ano;

b) a transformação das imagens de 16 para 8 bits o que acarreta em perda de informação radiométrica, além do processo não se desenvolver de forma rigorosamente igual para ambas as imagens;

c) os valores obtidos nos modelos de mistura, fruto da forma com que foram implementados no *software* SPRING, já que a maioria dos pixels ficam com valores diferentes daqueles esperados teoricamente; e

d) a área escolhida para estudo não conter sombras, ou água suficiente para caracterizar um pixel ASTER como puro, para este tipo de alvo primário.

## 11. Bibliografia

- Chuvieco, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: RIALP, 1996. 568 p.
- Lu, D.; Mausel, P.; Brondizio, E.; Moran, E. Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research. **International Journal of Remote Sensing**. v. 23, n. 13, 2651-2671, July. 2002.
- Shimabukuro, Y. E. **Shade images derived from linear mixing models of multispectral measurements of forested areas**. Tese (Doctor of Philosophy) - Colorado State University, Fort Collins, CO, 1987.
- 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, Mar. 1995.
- Song, C.; Woodcock, C.E.; Seto, K.C.; Pax Lenney, M.; Macomber, S.A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, v.75, n. 2, p. 230-244, 2001.