

## MISTURA ESPECTRAL: (III) QUANTIFICAÇÃO

**Osmar Abílio de Carvalho Júnior<sup>1</sup>, Ana Paula Ferreira de Carvalho<sup>2</sup>,  
Renato Fontes Guimarães<sup>3</sup>, Paulo Roberto Meneses<sup>4</sup>,  
Yosio Edemir Shimabukuro<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil.  
[osmar,yosio}@Itid.inpe.br](mailto:{osmar,yosio}@Itid.inpe.br)

<sup>2</sup>UnB - Universidade de Brasília - Departamento de Ecologia  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte - 70910-900, Brasília, DF, Brasil  
[anapaula@unb.br](mailto:anapaula@unb.br)

<sup>3</sup>UnB - Universidade de Brasília - Departamento de Geografia  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil.  
[renatofg@unb.br](mailto:renatofg@unb.br)

<sup>4</sup>UnB - Universidade de Brasília - Departamento de Geologia  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil.  
[pmeneses@unb.br](mailto:pmeneses@unb.br)

Recebido 2 de dezembro de 2002; revisado 12 de fevereiro de 2003; aceito 12 de março

**Resumo** – A abundância relativa de um dado material pode ser determinada estabelecendo uma relação de proporcionalidade entre uma característica da forma do espectro e a sua quantidade. No caso de análise de espectros ou de imagens hiperespectrais os estudos ficam focados nas feições de absorção diagnóstica dos elementos. O presente trabalho possui como objetivo apresentar uma revisão sobre os dois principais métodos de processamento digital de imagens para a quantificação espectral: a regressão linear e a profundidade da banda espectral. No trabalho é descrito o método de regressão linear simples bem como os métodos que utilizam a regressão linear múltipla como a Análise Linear de Mistura Espectral (ALME) e os procedimentos de sua evolução como o método *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*

(MESMA). As características da profundidade da banda de absorção são detalhadas evidenciando os seus efeitos na análise de mistura.

**Palavras – Chave** – mistura espectral, classificação espectral, sensoriamento remoto.

**Abstract** – The relative abundance of a material can be determined establishing a proportionality relationship between a characteristic of the form of the spectrum and its quantity. In the case of analysis of spectra or of hyperspectral images the studies are focused on the features of diagnostic absorption of the elements. The present work aims to present a revision about two main methods of digital image processing for spectral quantification: the linear regression and spectral band depth. In this work is described the linear regression method as well as the methods that utilize the multiple linear regression such as the Linear Spectral Mixing Analysis and the further procedures as the Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) method. The characteristics of the depth of the absorption band are detailed highlighting its effects in the mixture analysis.

**Keywords** – spectral mixture, spectral classification, remote sensing.

## INTRODUÇÃO

A abundância relativa de um dado material pode ser determinada estabelecendo uma relação de proporcionalidade entre uma característica da forma do espectro e a sua quantidade. No caso de análise de espectros ou de imagens hiperespectrais os estudos ficam focados nas feições de absorção diagnóstica dos elementos. Dentre os parâmetros morfométricos geralmente utilizados tem-se: área da feição de absorção, profundidade da banda central de absorção, largura da feição de absorção, albedo, inflexões da curva espectral, curvatura ou inclinação e as diferentes razões entre esses parâmetros (Cloutis

*et al.*, 1986). Usualmente esses parâmetros obtidos são posteriormente comparados com espectros de referência para obter uma quantificação relativa. Desta forma, é estabelecida uma função matemática entre as dimensões espectrais e a proporção de um dado material. Essa função matemática varia com o tipo de mistura que se está sendo analisada. Pode-se distinguir dois tipos de mistura com comportamentos distintos no cálculo de abundância: a mistura macroscópica e a mistura microscópica ou mistura íntima.

A mistura macroscópica ocorre em superfícies com partículas grandes e rugosas onde relativamente pouca luz é espalhada entre as partículas (Johnson *et al.*, 1983). Este fato torna a reflectância espectral de uma determinada superfície uma combinação linear das áreas de contribuição dos seus componentes, sendo o modelo denominado de tabuleiro de xadrez (checkerboard). Neste âmbito o emprego da regressão linear é amplamente utilizado. A abundância relativa do material procurado pode ser obtida a partir dos coeficientes da regressão linear.

Na mistura íntima, os componentes são de pequenas dimensões e a luz é espalhada e absorvida de forma múltipla no seu interior (Singer, 1981; Mustard & Pieters, 1989). Nesse tipo de mistura o comportamento espectral não é uma função linear dos seus membros puros. Aproximações teóricas têm sido desenvolvidas para descrever a interação da luz com a superfície das partículas baseadas na teoria de transferência de radiatividade de Chandrasekhar (1960) (Hapke, 1981, 1984, 1986; Lumme & Bowell, 1981). No entanto, esses modelos teóricos requerem múltiplas medições em diferentes geometrias de visada o que não é, comumente, obtidas pelas técnicas atuais de imageamento. Uma outra alternativa é o emprego de modelos empíricos onde são realizadas

calibrações em laboratório das propriedades mensuráveis do espectro com a quantidade a partir de uma série que abrange as diferentes proporções de mistura (Adams, 1974; Singer, 1981; Cloutis et al., 1986).

No presente trabalho são descritos os dois parâmetros morfométricos mais empregados para a determinação de abundância: os coeficientes da regressão linear e a profundidade da banda de absorção.

## O EMPREGO DA REGRESSÃO LINEAR PARA A QUANTIFICAÇÃO

O emprego da regressão linear vem sendo amplamente utilizado para a quantificação, principalmente no caso de mistura macroscópica. São utilizadas tanto regressões simples como múltiplas.

### REGRESSÃO SIMPLES

Considerando a regressão linear onde  $E_i = \beta E_r + \alpha$  tem-se as seguintes formulações para o cálculo dos coeficientes angular ( $\beta$ ) e linear ( $\alpha$ ):

$$\beta = \frac{\sum E_i E_r - ((\sum E_i \sum E_r) / n)}{\sum E_r^2 - ((\sum E_r)^2 / n)} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sum E_i - b \sum E_r}{n} \quad (2)$$

O coeficiente angular ( $\beta$ ) torna a variância do espectro de referência similar à da imagem, estabelecendo uma relação de proporcionalidade entre as áreas das feições. Desta forma, a proporção relativa do material procurado ( $E_r$ ) dentro do pixel ( $E_i$ ) é expressa diretamente a partir do coeficiente. No caso da mistura macroscópica, esse resultado explicita a porcentagem do material enquanto que, para o caso de mistura íntima, esse valor deve ser ajustado segundo uma função não linear.

Os valores negativos do coeficiente angular correspondem às áreas com correlação inversa, não apresentando significado para o presente estudo.

### **REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA**

O método de Análise Linear de Mistura (ALM) baseia-se no emprego da regressão múltipla para quantificar a proporção dos minerais presentes na imagem. Esse procedimento teve sua origem no tratamento de imagens multiespectrais (Horwitz *et al.*, 1971, 1975; Richardson *et al.*, 1975; Adams & Adams, 1984; Huete, 1986; Huete *et al.*, 1986), obtendo grande propagação em estudos astronômicos com propósito de definir a composição superficial de astros (Singer & McCord, 1979; Pieters *et al.*, 1985; Adams *et al.*, 1986; Bell & Hawke, 1995; Blewett *et al.*, 1995; Staid *et al.*, 1996; Mustard & Head, 1996, Smith *et al.*, 1985). Com o advento do sensor Airborne Imaging Spectrometer (AIS) Smith & Adams (1985) transferiram e aprimoraram a metodologia para imagens hiperespectrais onde foram realizados inúmeros trabalhos (Mustard & Pieters, 1987a,b; Mustard, 1993; Ustin *et al.*, 1992; Roberts *et al.*, 1993b entre outros).

O método de ALM estabelece uma função  $E_i = f(E_{r_1}, E_{r_2}, E_{r_3}, \dots, E_{r_n})$  onde o espectro da imagem é resultante da combinação linear de um conjunto de espectros de referência ( $E_{r_{1,2,\dots,n}}$ ), representada na seguinte equação geral:

$$E_i = \beta_0 + \beta_1 E_{r_1} + \beta_2 E_{r_2} + \beta_3 E_{r_3} + \dots + \beta_n E_{r_n} \quad (3)$$

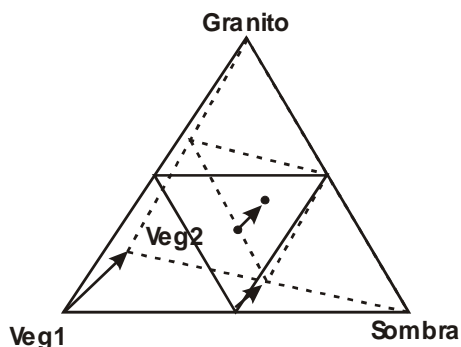
Aplicando-se os conceitos da teoria dos mínimos quadrados, podemos notar o seguinte sistema de equações normais para obtenção dos coeficientes angulares:

$$\begin{array}{rcl}
\sum Ei = & n\beta_0 + & \beta_1 \sum Er_1 + \beta_2 \sum Er_2 + \dots \beta_n \sum Er_n \\
\sum Er_1 Ei = & \beta_0 \sum Er_1 + & \beta_1 \sum Er_1 Er_1 + \beta_2 \sum Er_2 Er_1 + \dots \beta_n \sum Er_n Er_1 \\
\sum Er_2 Ei = & \beta_0 \sum Er_2 + & \beta_2 \sum Er_1 Er_2 + \beta_2 \sum Er_2 Er_2 + \dots \beta_n \sum Er_n Er_2 \\
\sum Er_3 Ei = & \beta_0 \sum Er_3 + & \beta_3 \sum Er_1 Er_3 + \beta_2 \sum Er_2 Er_3 + \dots \beta_n \sum Er_n Er_3 \\
\cdot & \cdot & \cdot \\
\cdot & \cdot & \cdot \\
\sum Er_n Ei = & \beta_0 \sum Er_n + & \beta_4 \sum Er_1 Er_n + \beta_2 \sum Er_2 Er_n + \dots \beta_n \sum Er_n Er_n
\end{array}$$

Os valores dos coeficientes angulares estabelecem uma relação de proporcionalidade de cada espectro referência na mistura espectral analisada. As frações podem ser reordenadas para dar um somatório igual a 1 embora as frações individuais possam não estar restrito ao intervalo entre 0 e 1. Esses erros, que resultam em frações irreais são provenientes do pressuposto da ALM que apenas um grupo de membros finais possam descrever todos os pixels da cena analisada (Roberts *et al.*, 1997). Assim, o êxito da ALM possui uma forte dependência da quantidade e qualidade dos membros finais utilizados, pois qualquer tipo de interferência por parte de um membro final afeta todos os demais *pixels*. Pode-se descrever três tipos de erros na ALM considerando os membros finais utilizados: (a) excessiva simplificação ou retirada dos membros finais; (b) inserção de muitos membros para descrever uma cena; e (c) presença de espectros que não podem ser modelados a partir dos membros finais (Sabot *et al.*, 1992a).

Quando um reduzido conjunto de membros finais é usado para descrever uma superfície complexa da imagem adicionam-se algumas incertezas na ALM. Sabot *et al.* (1992a) demonstraram o comportamento desse tipo de erro a partir de uma situação com quatro membros finais: a) granito, b) sombra, c) vegetação

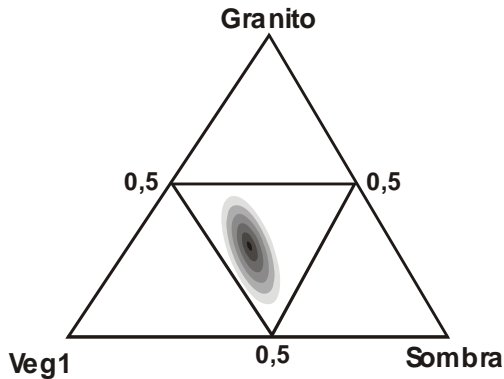
tipo 1 e d) vegetação tipo 2. A exclusão da componente da vegetação tipo 2 ocasionou sua redefinição estabelecendo uma mistura com os demais elementos contendo aproximadamente 80% da vegetação 1, 15% do granito e 5% de sombra (**Figura 1**). Portanto, toda vez que a vegetação tipo 2 estiver presente em um pixel, mesmo em pequenas quantidades, observa-se um deslocamento dos valores percentuais dos demais membros puros, como é indicado pelas setas da **Figura 1**.



**Figura 1** – Demonstração do erro pela não consideração do membro final referente à vegetação tipo 2. As setas indicam a alteração quando a vegetação tipo 2 está presente (Fonte: Sabol *et al.*, 1992a - modificado).

A inserção de cada membro final introduz na ALM um grau de erro inerente. Desta forma, na presença de muitos membros finais aumenta a nuvem de incerteza para uma estimativa (**Figura 2**). Observa-se que o membro final com maior imprecisão ocasiona um alongamento da nuvem segundo sua direção. Na **Figura 2** observam-se faixas de maior probabilidade de erro que aumentam em direção ao centro da elipse. Essa imprecisão pode levar a determinar para

algum pixel a presença de um material que, na verdade, inexistente. Portanto, os principais fatores de erro com o aumento de membros finais são: aumento da variabilidade do erro e estabelecimento de uma estimativa equivocada.



**Figura 2** – Demonstração da área de imprecisão referente aos diferentes membros finais (Fonte: Sabol *et al.*, 1992a - modificado).

Outra fonte de erro é proveniente dos componentes que estão presentes em baixos teores na mistura que não são passíveis de serem modelados adequadamente pela ALM. Esses, quando adicionados no modelo, provocam um aumento do erro ocasionando o aumento da incerteza do fracionamento e o aumento da fração residual. Tais elementos devem receber tratamento especial.

Devido a esses erros descritos, inicialmente, buscou-se soluções matemáticas para restringir as frações das componentes de mistura para valores entre 0 e 1. Os trabalhos de Shimabukuro & Smith, (1991) e Boardman & Goetz, (1991) estabelecem métodos para o cálculo das abundâncias relativas de forma a serem não negativas e com o seu respectivo somatório menor ou igual a 1.



Shimabukuro & Smith (1991) avaliam dois métodos Constrained Least Square (CLS) e o Weighted Least Square (WLS). Boardman & Goetz (1991) utilizam a formulação matemática desenvolvida por Lawson & Handson (1974) que considera o efeito de sombra e iluminação como um fator de ganho desconhecido contrapondo-se a sua utilização como um membro final da mistura como descrito por Gillespie *et al.* (1990).

Métodos também foram formulados de forma a analisar os espectros residuais da ALM, dentre eles destaca-se: análise do resíduo (Gillespie *et al.*, 1990), análise Foreground - Background (AFB) (Smith *et al.*, 1994) e análise hierárquica do Foreground – Background (AHFB) (Pinzón *et al.*, 1995).

Uma outra abordagem para o emprego da regressão linear foi o modelo denominado MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*) que estabelece para cada pixel diferentes conjuntos de membros finais (Roberts *et al.*, 1998a). Neste método são simuladas todas as combinações possíveis dos espectros de referência por meio de regressões múltiplas. Cada combinação é denominada de modelo. O melhor modelo existente para o pixel é determinado pelo menor erro médio quadrático (Smith *et al.*, 1992; Sabol *et al.*, 1992b; Roberts *et al.*, 1992).

Como exemplo, podemos analisar uma situação onde uma imagem é descrita por três membros finais (espectros de referência). Nesse caso o algoritmo estabelece um conjunto de sete modelos referentes a todas as combinações possíveis dos espectros de referência (**Figura 3**). Dentre os sete modelos o que apresentar o menor erro médio quadrático e não possuir coeficiente angular negativo é considerado como o adequado para o pixel em análise. Esse

procedimento contrasta com o método ALM que consideraria apenas o primeiro modelo da **Figura 3** calculando a abundância mesmo sendo o modelo inadequado.

$$\begin{aligned}
 \text{mod } elo1 &\rightarrow Ei = \beta_0 + \beta_1 Er_1 + \beta_2 Er_2 + \beta_3 Er_3 \\
 \text{mod } elo2 &\rightarrow Ei = \beta_0 + \beta_1 Er_1 + \beta_2 Er_2 \\
 \text{mod } elo3 &\rightarrow Ei = \beta_0 + \beta_1 Er_1 + \beta_3 Er_3 \\
 \text{mod } elo4 &\rightarrow Ei = \beta_0 + \beta_2 Er_2 + \beta_3 Er_3 \\
 \text{mod } elo5 &\rightarrow Ei = \beta_0 + \beta_1 Er_1 \\
 \text{mod } elo6 &\rightarrow Ei = \beta_0 + \beta_2 Er_2 \\
 \text{mod } elo7 &\rightarrow Ei = \beta_0 + \beta_3 Er_3
 \end{aligned}$$

**Figura 3** – Modelos de regressão múltipla a partir do conjunto de três membros finais.

Esse método tem sido aplicado no mapeamento de áreas com cobertura de neve (Painter *et al.*, 1998a, 1998b), de vegetação em região de chaparral (Gadner, 1997; Roberts *et al.*, 1998a, 1998b), vegetação em regiões semi-áridas (Okin *et al.*, 1998, 1999a), mapeamento mineralógico (Carvalho Júnior & Guimarães, 2001). No entanto um grande empecilho para a utilização desse método é o tempo computacional (Okin *et al.*, 1999b).

### ANÁLISE QUANTITATIVA A PARTIR DA PROFUNDIDADE DA BANDA DE ABSORÇÃO

A profundidade da banda de absorção é um dos principais métodos utilizados para a quantificação, principalmente, considerando situações de mistura íntima. Esse método utiliza os princípios da remoção do contínuo utilizada por Clark & Roush (1984).

## REMOÇÃO DO CONTÍNUO

A remoção do contínuo permite isolar a área relativa à feição espectral retirando o efeito do *background*. A operação matemática utilizada é a divisão da feição espectral (E) pelo valor do contínuo (C):

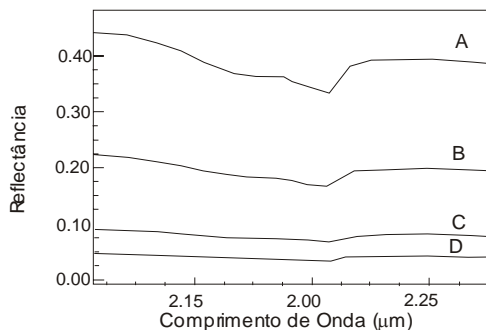
$$E_c = \frac{E}{C} \quad (4)$$

As características morfométricas provenientes de sua aplicação podem ser descritas a partir de operações matemáticas multiplicativas e aditivas sobre o espectro.

A multiplicação ou a divisão do espectro por um determinado valor (V) não altera o espectro removido do contínuo ( $E_c$ ). Isto porque essas operações afetam igualmente o denominador e o numerador da equação (5), o que anula o seu efeito.

$$E_c = \frac{E * V}{C * V} = \frac{E}{C} \quad (5)$$

Assim, a sombra, que se comporta como um divisor do espectro, não afeta a curva espectral removido do contínuo. Como exemplificação a **Figura 4** apresenta a feição da caulinita dividida pelos valores 2, 5 e 10 com sucessiva diminuição da feição espectral. Observa-se que, com a remoção do contínuo, as curvas tornam-se idênticas (**Figura 5**).



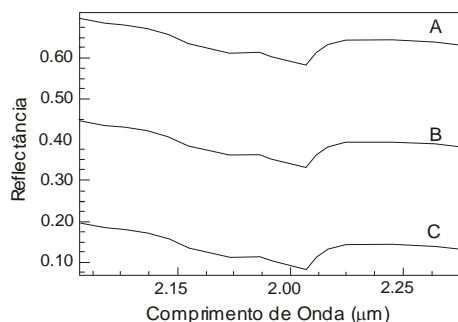
**Figura 4** – Espectro da caulinita simulando o efeito da sombra: (a) espectro normal, (b) dividido por 2, (c) dividido por 5, e (d) dividido por 10 .

**Figura 5** – Curvas espectrais da Figura 4 após o emprego da remoção do contínuo.

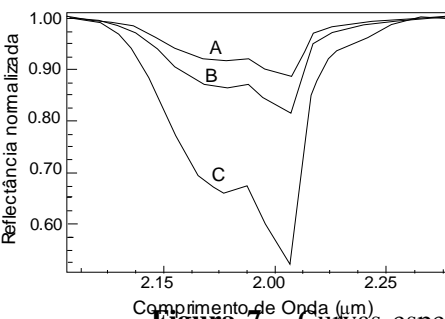
Operações de adição e subtração sobre espectros apresentam variações no seu espectro removido do contínuo. A **equação (6)** expressa a relação de soma evidenciando que, quanto maior for o valor adicionado, menor é o valor de  $E_c$ . Apesar da soma manter a relação da diferença igual entre o contínuo e o espectro, a relação de proporção muda. Assim, a diferença entre 0,2 e 0,1 é igual a 0,9 e 0,8, porém, sua razão apresenta resultados diferentes.

$$E_c = \frac{E + V}{C + V} \quad (6)$$

Como exemplificação, realizam-se duas operações matemáticas para o espectro da caulinita: a) soma-se um valor de 0,25 e b) subtrai-se 0,25 (**Figura 6**). Após a remoção do contínuo, a curva que foi adicionada possui área e intensidade de absorção menores (**Figura 7**). Em contraposição, o espectro que foi subtraído apresenta um pronunciado aumento. Apesar das mudanças terem sido uniformes, utilizando-se o valor absoluto de 0,25, os espectros removidos do contínuo não as refletem.



**Figura 6**– Comportamento da feição da caulinita (A) após a soma de 0,25 (B) e da subtração de 0,25 (C).



**Figura 7** – Curvas espectrais da **Figura 6** após o emprego da remoção do contínuo.

A remoção do contínuo em espectros provenientes de misturas apresenta uma conjugação das duas características descritas: a) multiplicativas e b) aditivas. Para tornar mais fácil essa demonstração considera-se uma mistura macroscópica, de comportamento linear, onde um espectro de referência do elemento em análise ( $E_r$ ) é misturado igualmente a um outro  $E_2$ . O espectro proveniente da mistura é:

$$Em = \frac{Er_1 + Er_2}{2} = \frac{Er_1}{2} + \frac{Er_2}{2} \quad (7)$$

Essa equação pode ser expressa como uma relação linear entre o espectro da mistura (obtido na imagem) com relação ao espectro de referência  $Er$ , onde se tem que  $\beta = 1/2$  e  $\alpha = Er_2/2$ .

A adição é inerente à mistura, o que resulta em espectros removidos do contínuo sempre com dimensões menores que os da feição pura. Para os espectros removidos do contínuo o parâmetro morfométrico mais difundido para a quantificação é a profundidade da banda de absorção.

Deve-se salientar que a escolha da feição de absorção de um determinado material para análise em uma mistura é realizada de forma que os demais materiais presentes tendam a ter um comportamento linear para a mesma porção do espectro, de forma a ocasionar uma menor interferência.

## **A PROFUNDIDADE DA BANDA DE ABSORÇÃO**

Esse procedimento de análise originou-se da análise espectral de misturas em laboratórios (Clark, 1981; McCord *et al.*, 1981; Clark, 1983; Clark & Lucey, 1984; Singer, 1981). Clark *et al.* (1990) transferiram essa técnica para o tratamento dos dados AVIRIS confeccionando imagens de profundidade das bandas de absorção. A partir disso, inúmeros trabalhos utilizaram essa técnica na espectroscopia de imageamento (Bruegge *et al.*, 1990; Kaufman & Gao, 1992; Baugh *et al.*, 1998; Reinhäkel & Müller, 1998).

A profundidade considera apenas a banda de maior intensidade da feição de absorção do espectro ( $P_f$ ) em relação à refletância do contínuo ( $C$ ): (Clark & Roush, 1984):

$$Pf = 1 - \frac{Rb}{Rc} = \frac{Rc - Rb}{Rc} \quad (8)$$

A observação gráfica demonstra a influência do albedo nessa relação. Para obter um valor de porcentagem do elemento na mistura foi proposto um índice denominado de escala (Baugh, 1998), que estabelece uma relação da banda de profundidade da imagem (Pfi) em relação à banda de profundidade de um espectro de referência (Pfr):

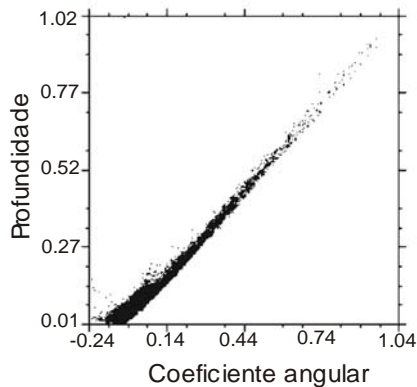
$$Escala = \frac{Pfi}{Pfr} \quad (9)$$

Pode-se considerar que a profundidade da banda e o coeficiente escala procuram simular o comportamento da mistura íntima. Desta forma, esses coeficientes descrevem um comportamento não linear onde os espectros de reflectância mais baixa exercem uma maior influência na diminuição dos índices. Porém, deve-se atentar que esses novos índices também se apresentam muito distantes dos dados reais observados na mistura íntima. Desta forma, a semi-quantificação dos elementos que compõem uma mistura é obtida a partir do estabelecimento de uma função matemática entre o valor da profundidade da banda ou escala com a sua real abundância. Como exemplo, Clark & Lucey (1984) utilizaram, para a análise de mistura íntima de particulados no gelo, operações matemáticas sobre a banda da profundidade para expressar sua quantidade.

### **A RELAÇÃO DE ÁREA DA FEIÇÃO ESPECTRAL COM A PROFUNDIDADE**

A proporção da área da feição de absorção presente na imagem, considerando o espectro de referência removido do contínuo, pode ser calculada por intermédio do coeficiente angular.

O coeficiente angular desses espectros removidos do contínuo apresenta uma íntima correlação com o fator escala. Como exemplificação é apresentado o gráfico de dispersão utilizando o coeficiente escala em contraposição ao coeficiente angular para vários espectros de caulinita (**Figura 8**).



**Figura 8** - Gráficos de dispersão entre os valores de profundidade e coeficiente angular para espectros de caulinita demonstrando a correlação entre esses parâmetros.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cálculo da abundância relativa é um dos principais campos de pesquisa em sensoriamento remoto. A espacialização da quantidade relativa de um dado material dentro de uma amostra ou de um pixel possui importância na construção de modelos ecológicos, geológicos, entre outros. A diferença entre as misturas macroscópica e íntima torna necessária a formulação de metodologias específicas para calibração das características do espectro com a quantidade. Devido à mistura macroscópica ser descrito por uma função linear dos seus constituintes, grande esforço vem sendo feito no aprimoramento de métodos fundamentados na regressão linear múltipla. Dentre os métodos o MESMA, desenvolvido a



partir da ALME, é o que apresenta maior complexidade por coadunar a capacidade de identificação espectral e quantificação. Muitas pesquisas principalmente na análise de mistura íntima são centralizados nas características das feições de absorção. No entanto para o seu uso no processamento de imagens necessita de dados provenientes da espectroscopia de imageamento que ainda não são de uso corriqueiro. Nesse procedimento a profundidade da banda de absorção é uma das características espectrais mais utilizadas tendo uma grande divulgação entre os pesquisadores da USGS. No entanto, outros parâmetros como largura da banda também apresenta relativa eficiência na estimativa de abundância. Novos estudos nessa área de pesquisa vêm sendo promovidos com o advento de novos sensores hiperespectrais.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ADAMS, J. B. (1974). Visible and near-infrared diffuse reflectance: Spectra of pyroxenes as applied to remote sensing of solid objects in the solar system. *J. Geophys. Res.*, 79, 4829 - 4836.
- ADAMS, J. B., ADAMS J. (1984). Geologic mapping using Landsat MSS and TM images: Removing vegetation by modeling spectral mixtures. In: Thematic Conf. Remote Sens. for Expl. Geol. ERIM, 3, *Proceedings*, 2:615-622.
- ADAMS, J. B., SMITH, M. O., JOHNSON, P. E. (1986). Spectral Mixture Modeling. A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 Side. *J. Geophys. Res.*, 91:8-98-8122.
- BAUGH, W. M., KRUSE, F. A., ATKINSON JR., W. W. (1998). Quantitative geochemical mapping of ammonium minerals in the southern cedar mountains, Nevada, using the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Remote Sens. Environ.* 65:292-308.

- BELL, J. F., HAWKE, B. R. (1995). Compositional variability of the Serenitatis/Tranquillitatis region of the moon from telescopic multispectral imaging and spectroscopy, *Icarus*, 118:51-68.
- BLEWETT, D. T., HAWKE, B. R. LUCEY, P. G., TAYLOR, G. J., JAUMANN, R., SPUDIS, P. D. (1995). Remote sensing and geologic studies of the Schiller-Scickard region of the moon, *J. Geophys. Res.*, 100:16959-16972.
- BOARDMAN, J. W., GOETZ, A. F. H. (1991). Sedimentary facies analysis using AVIRIS data: a geophysical inverse problem. AVIRIS Workshop, 3, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL-Publ. 91-28, 4-13.
- BRUEGGE, C. J., CONEL, J. E., MARGOLIS, J. S. (1990). In situ atmospheric water-vapor retrieval in support of AVIRIS validation. In: *Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment*, SPIE Vol. 1298, p.150-163.
- CARVALHO JUNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F. (2001). Employment of the Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) Method in Mineral Analysis. In: *JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP*, 10, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL, Publ.02, p. 73-80.
- CLARK, R. N. (1981). Water frost and ice: The near spectral reflectance 0.65-2.5 $\mu$ m, *J. Geophys. Res.*, 86:3087-3096.
- CLARK, R. N. (1983). Spectral properties of mixtures of montmorillonite and dark carbon grains: Implications for remote sensing minerals containing chemically and physically adsorbed water, *J. Geophys. Res.*, 88:10635-10644.
- CLARK, R. N., LUCEY, P. G. (1984). Spectral properties of ice-particulate mixture and Implications for Remote Sensing 1. Intimate Mixtures. *J. Geophys. Res.*, 89:6341-6348
- CLARK, R. N., ROUSH, T. L. (1984). Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *J. Geophys. Res.*, 89:6329-6340.

- CLOUTIS, E. A.; GAFFEY, M. J.; JACKOWSKI, T. L.; REED, K. L. (1986). Calibrations of Phase Abundance, Composition, and Particle Size Distribution for Olivine – Orthopyroxene Mixtures from Reflectance Spectra. *J. Geophys. Res.*, 91(B11):11641-11653.
- GADNER, M. (1997). Mapping chaparral with Aviris using advanced remote sensing techniques, Master of Arts thesis: Department of Geography, University of California, Santa Barbara, CA.
- GILLESPIE, A. R., SMITH, M. O., ADAMS, J. B., WILLIS, S. C., FISCHER, A. F., SABOL, D. E. (1990). Interpretation of residual images: spectral mixture analysis of AVIRIS images, Owens Valley, California. In: Annual JPL Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 2, Pasadena, CA, *Proceedings*, JPL Publ. 90-54, 243-270.
- HAPKE, B. (1981). Bidirectional reflectance spectroscopy, 1, Theory. *J. Geophys. Res.*, 86, 3.039-3.054.
- HAPKE, B. (1984). Bidirectional reflectance spectroscopy, 3, Correction for macroscopic roughness. *Icarus*, 59, 41-59.
- HAPKE, B. (1986). Bidirectional reflectance spectroscopy, 4, The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, 67, 264-287.
- HORWITZ, H. M., LEWIS J. T., PENTLAND, A. P. (1975). Estimating proportions of objects from multispectral scanner data. Final Report, NSAS Contract NAS9-14123, NASA-CR-141862, 108p.
- HORWITZ, H. M., NALEPKA, R. F., HYDE, P. D., MORGENSTERN, J. P. (1971). Estimating the proportions of objects within a single resolution element of a multispectral scanner. In: Int'l Symp. Remote Sens. Environ, 7, Ann Arbor, MI, *Proceedings*, 1307-1320.
- HUETE, A. R. (1986). Separation of soil-plant spectral mixture by factor analysis. *Remote Sens. Environ.*, 19:237-251.

- HUETE, A. R., JACKSON, R. D., POST, D. F. (1986). Spectral response of plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.*, 17:37-53.
- JOHNSON, P. E., SMITH, M. O., TAYLOR-GEORGE, S., ADAMS, J. B. (1983). A semi-empirical method for analysis of the reflectance spectra of binary mineral mixtures. *J. Geophys. Res.*, 88, 3557-3561.
- KAUFMAN, Y. J., GAO, B-C. (1992). Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30(5):871-884.
- LAWSON, C.L., HANSON, R.J. (1974). Solving least square problems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- LUMME, K. & BOWELL, E. (1981). Radiative transfer in the surfaces of atmospheres bodies, I, *Theory. Astron. J.*, 86, 1.694-1.704.
- MCCORD, T. B.; CLARK, R. N.; HAWKE, B. R., MACFADDEN, L. A.; OWENSBY, P. D.; PIETERS, C. M., ADAMS, J. B. (1981). Moon: Near-infrared spectral reflectance, a first good look, *J. Geophys. Res.*, 86:10883-10892.
- MUSTARD, J. F. (1993). Relationships of soil, grass, and bedrock over the Kaweah Serpentinite Melange through spectral mixture analysis of AVIRIS data. *Remote Sens. Environ.*, 44:293-308.
- MUSTARD, J. F., HEAD, J. W. (1996). Mare-highland mixing relationships along the southwestern shores of Oceanus Procellarum. *J. Geophys. Res.*, 101:18913-18925.
- MUSTARD, J. F., PIETERS, C. M. (1987a). Quantitative abundance estimates from bidirectional reflectance measurements. *J. Geophys. Res.*, 92:E617-E626.
- MUSTARD J. F., PIETERS C. M. (1987b). Abundance and distribution of ultramafic microbreccia in Moses Rock dike: Quantitative application mapping spectroscopy. *J. Geophys. Res.*, 92:10376-10390.
- MUSTARD, J. F., PIETERS, C. M. (1989). Photometric phase functions of common geologic minerals and applications to quantitative analysis of mineral mixture reflectance spectra. *J. Geophys. Res.*, 94, B10:13.619-13.634.

- OKIN, G. S., OKIN, W. J., ROBERTS, D. A., MURRAY, B. (1998). Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis: application to an arid/semi-arid landscape. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 7, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL Publ. 97-21, p.291-299.
- OKIN, W. J.; OKIN, G. S.; ROBERTS, D. A; MURRAY B. (1999a). Multiple Endmember spectral Mixture Analysis: Endmember Choice in an Arid Shrubland, In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 8, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL-Publ. 99-17, p.323-331.
- OKIN, G. S.; SIEGEL, H.; COLLIER, J.; MILLER, G. D., OKIN, W. J.; ROBERTS, D. A., MURRAY B., CURKENDALL, D. W.; PAINTER, T. H. (1999b). The supercomputing visualization workbench for analysis and classification of imaging spectrometer data. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 8, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL-Publ. 99-17, p.317-322.
- PAINTER, T. H., ROBERTS, D. A.; DOZIER J.; GREEN, R. O. (1998a). Automated subpixel snow parameter mapping with AVIRIS data In: Airborne Earth Science Workshop, 7, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL-Publ.97-21, p.301-307.
- PAINTER, T. H., ROBERTS, D. A., GREEN, R. O., DOZIER J. (1998b). The effect of grain size on spectral mixture analysis of snow – covered area from AVIRIS data. *Remote Sens. Environ.* 65:320-332.
- PIETERS, C. M., ADAMS, J. B., MOUGINIS-MARK, P. J., ZISK, S. H., SMITH, M. O. HEAD, J. W., MCCORD, T. B. (1985). The Nature of Crater Rays: The Copernicus example. *J. Geophys. Res.* 90:12392-12413.
- PINZÓN, J. E., USTIN, S. L., HART, Q. J., JACQUEMOUD, S. & SMITH, M. O. (1995). Using foreground/background analysis to determine leaf and canopy chemistry. In: JPL Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 6, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL-Publ. 95-1, p.129-132.

- REINHÄCKEL G., MÜLLER A. (1998). Quantitative analysis of lignite dumps in Central Germany using thermal infrared spectrometry (7.5 –1.3  $\mu\text{m}$ ). In: EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, 1, Remote Sensing Laboratories, University of Zurich, Switzerland, *Proceedings*, 349-356.
- RICHARDSON, A. J. WIEGAND, C. L., GAUSMAN, H. W., CUELLAR, J. A., GENERMANN, A. H. (1975). Plant, soil and shadow reflectance components of row crops. *Photogramm. Engr. Remote Sens.* 41:1401-1407.
- ROBERTS, D. A., SMITH, M. O., SABOL, D. E., ADAMS, J. B., USTIN, S. (1992). Mapping the Spectral variability in photosynthetic and non-photosynthetic vegetation, soils and shade using AVIRIS. In: Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 3, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL Publ. 92-14, p.38-40.
- ROBERTS, D. A.; GREEN, R. O.; SABOL, D. E.; ADAMS, J. B. (1993). Temporal Changes I Endmember Abundances, Liquid Water and Water Vapor Over Vegetation at Jasper Ridge. In: Annual JPL Geoscience Workshop, 4, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL Publ. 93-96, p.153-156
- ROBERTS, D. A., GREEN, R. O., ADAMS, J. B. (1997). Temporal and spatial patterns in vegetation and atmospheric properties from AVIRIS. *Remote Sens. Environ.* 62:223-240.
- ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH R., USTIN, S. SCHEER, G., GREEN, R. O. (1998a). Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sens. Environ.* 65:267-279.
- ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; REGELBRUGGE, J.; PEDREROS, D.; USTIN, S. L. (1998b). Mapping the Distribution of Wildfire Fuels Using AVIRIS in the Santa Monica Mountains. In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 7, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL Publ. 97-21 v.1, p.345-352.

- SABOL, D. E. JR., ADAMS J. B. & SMITH M. O. (1992a). Quantitative Subpixel Spectral of Targets in Multispectral Images, *Journal of Geophysical Research*, 97(E2): 2659-2672.
- SABOL, D. E. JR., ROBERTS, D. A., SMITH, M. O., ADAMS, J. B. (1992b). Temporal variation in spectral detection thresholds of substrate and vegetation in AVIRIS images, In Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 3, Pasadena, CA. Proceedings, JPL Publ. 92-14, p.132-134.
- 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(1): 16-20.
- SINGER, R. B. (1981). Near-infrared reflectance of mineral mixtures: Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides. *J. Geophys. Res.*, 86, 7967-7982.
- SINGER, R., MCCORD, T. B. (1979). Mars: large scale mixing of bright and dark surface materials and implication for analysis of spectral reflectance. Lunar Planet Sci. Conf., 10, Proceedings, 1835-1848.
- SMITH, M. O., ADAMS, J. B., USTIN, S. L., ROBERTS, D. A. (1992). Using endmembers in AVIRIS images to estimate changes in vegetative biomass. In: Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 4, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL Publ. 92-14, p.69-71.
- SMITH, M. O., ROBERTS, A. D., HILL J., MEHL, W., HOSGOOD, B., VERDEBOUT, J., SCHMUCK, G. KOEHLER, C., ADAMS, J., B. (1994). A New Approach to Quantifying Abundances of Materials in Multispectral Images. In: IGARSS, Proceedings, 2372-4.
- SMITH, M. O., ADAMS, J. B. (1985). Interpretation of AIS images of Cuprite, Nevada, using constrains of spectral mixtures. In: Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop. Pasadena, CA. Proceedings, JPL Publ. 85-41, p. 62-68.

- SMITH, M. O., JOHNSON, P. E., ADAMS, J. B. (1985). Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal components analysis. Proc. 15th Lunar Planet. Sci. Conf. Part2. *J Geophys. Res.*, 90:C797-C804.
- STAID, M. I., PIETERS, C. M., HEAD, J. W. (1996). Mare tranquillitatis: basalt emplacement history and relation to lunar samples. *J. Geophys. Res.*, 101:23213-23228.
- USTIN, S. L., SMITH, M. O., ADAMS, J. B. (1992). Multitemporal diurnal AVIRIS images of a forested ecosystem. In: Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 4, Pasadena, CA. *Proceedings*, JPL Publ. 92-14, p.141-143.