

Aplicação do Modelo de Mistura na Decomposição do Espectro de
Reflectância da Água em Espectros de seus Componentes
Opticamente Ativos: Uma Avaliação

EVLYN MARCIA LEÃO DE MORAES NOVO¹
YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO²

¹Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

²Goddard Space Flight Center
Greenbelt - MD - USA

Abstract. The linear mixing models have been applied successfully to determine the fractional abundance of pure endmembers contributing to the radiance of a mixed pixel. The resulting abundances are then reassembled spatially to provide subpixel information. In the present paper, the linear mixing model is being applied to determine in which proportion the reflectance of each optically active component contributes to the water reflectance. Spectral reflectance factors measured at the Tucurui reservoir during April 1992 were used to carry out this study. To select the endmembers the following criteria were used: 1- the pure endmember of a given water component was represented by the spectrum of the sample station where that component has the highest concentration; 2- the pure endmember selected were: chlorophyll, dissolved organic matter and total of suspended solids. As the final objective of the unmixing process is to generate pure endmember spectra to help the interpretation of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometric (AVIRIS) data, all the spectral were resampled to its resolution. The following analyses were performed to assess the suitability of the model: 1- computation of the correlation coefficients between the fractional abundance of given endmember and the component concentration for the unmixed spectra in the range between 400nm and 800nm; 2- the determination of the residuals; 3- computation of the correlation coefficient between the water component concentration and the fractional abundance of a given endmember resulting from application of the mixing model to various spectral windows selected according to the residuals. The results showed that the correlation coefficient between the fractional abundances of the selected endmembers and the concentration of optically active components are different in the different spectral regions. The results showed that it is possible to unmix the chlorophyll signal in the red region, and that the best region to unmix the TSS is the green region.

Resumo. Os modelos lineares de mistura têm sido aplicados com bastante sucesso na determinação das proporções de componentes puros que contribuem para a radiância de um pixel e na transformação destas proporções em imagens com a distribuição espacial dos mesmos. Neste trabalho, o modelo linear de mistura está sendo aplicado para determinar a proporção com que a reflectância de cada componente opticamente ativo contribui para a reflectância total da água. Para a realização do trabalho foram utilizados dados espectrais coletados em abril de 1992 no reservatório da UHE Tucuruí. Para a seleção de três estações amostrais representativas dos componentes puros adotou-se o seguinte critério: o espectro puro de um dado componente opticamente ativo seria representado pela estação amostral com máxima concentração daquele componente e mínima concentração dos demais componentes. Os componentes puros selecionados foram: clorofila, matéria orgânica dissolvida e totais de sólidos em suspensão. Como o objetivo final deste estudo era gerar espectro de componentes puros da água para integrar uma biblioteca de espectros que auxilie a interpretação de dados do Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), os dados espectrais foram reamostrados para a resolução espectral daquele sensor. Para avaliar o desempenho do modelo de mistura as seguintes análises foram feitas: 1- cálculo da correlação entre a fração de um dado endmember e a concentração do componente opticamente ativo que representa na região espectral compreendida entre 400 e 800nm; 2- cálculo do resíduo; 3- cálculo do coeficiente de correlação entre a fração de um dado endmember e a concentração do componente ativo representado por ele, quando o modelo de mistura foi aplicado a diferentes janelas espectrais selecionadas a partir da análise dos resíduos. Os resultados mostraram que os coeficientes de correlação entre os componentes opticamente ativos e as frações de espectros puros variam nas diferentes janelas espectrais. Os resultados também permitiram verificar que o sinal produzido pela clorofila pode ser separado daquele produzido pelos demais componentes na região vermelha do espectro.

1. Introdução

O espectro de reflectância de um dado sistema aquático contém informações sobre a concentração e tipo de componentes opticamente ativos no volume d'água. Tais componentes opticamente ativos têm sido classificados em três categorias amplas: 1- pigmentos fotossintetizadores presentes no fitoplâncton; 2- partículas em suspensão na coluna d'água; 3- substâncias orgânicas

dissolvidas (Kirk, 1986). O principal impacto dos pigmentos fotossintetizadores e das substâncias orgânicas dissolvidas é o de absorver radiação eletromagnética em duas grandes regiões: 400nm a 500nm, e 600nm a 700nm. O principal impacto das partículas em suspensão é retroespalhar a radiação eletromagnética. Com o avanço do conhecimento no campo da óptica hidrológica, tem sido reconhecida a importância de outros componentes opticamente ativos como as bactérias,

virus, colóides, como também a importância do espalhamento inelástico e das emissões naturais na interpretação da cor da água em termos de sua composição (Mobley, 1992).

A quantificação da concentração de componentes opticamente ativos em sistemas aquáticos continentais tropicais a partir da utilização de sensores de baixa resolução espectral é bastante difícil. Estudos realizados na última década (Braga, 1988; Novo e Braga, 1992) demonstram que neste tipo de ambiente não há condições de se derivar algoritmos semelhantes aos do Coastal Zone Color Scanner (CZCS) que podem ser universalmente aplicados a águas oceânicas. Os algoritmos desenvolvidos para o CZCS (Gordon e Morel, 1983) puderam ser desenvolvidos porque se aplicam a regiões onde os seguintes pressupostos podem ser aceitos: 1- os pigmentos fotossintetizadores do fitoplâncton são os principais responsáveis pelo espectro de reflectância da água; 2- as concentrações dos demais componentes são desprezíveis; 3- os demais componentes covariam no tempo e no espaço com os pigmentos fotossintetizadores.

Nos sistemas aquáticos continentais tropicais todos os componentes opticamente ativos ocorrem em altas concentrações e não necessariamente covariando espacialmente. Com isso, torna-se extremamente difícil quantificar a concentração de pigmentos fotossintetizadores, na presença de substâncias orgânicas dissolvidas, visto que os dois componentes atuam na mesma região do espectro. Nestas circunstâncias as concentrações de pigmentos ou

de substâncias orgânicas dissolvidas são amplamente superestimadas.

Estudos realizados através de simulações em laboratórios (Witte et al., 1982; Novo et al., 1989; Chen et al., 1992; Gitelson, 1992; Mantovani, 1993) e através de modelagem numérica (Morel e Prieur, 1977; Carder et al., 1991; Gallie et al. 1992) têm demonstrado que tais componentes opticamente ativos poderiam ser separados a partir da análise de imagens com alta resolução espectral.

Com o advento de espectrorradiômetros imageadores, tal como o Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) com 224 canais espectrais (Green, 1990), novos métodos de análise de imagens têm sido propostos. Dentre eles destacam-se os modelos lineares e não-lineares de mistura.

Os modelos de mistura têm sido utilizados desde a década de 70 como um método de se determinar as proporções de componentes puros dentro de um elemento de resolução de imagem (Shimabukuro e Smith, 1990). O modelo de mistura se baseia no pressuposto de que a reflectância medida num dado pixel de uma imagem, resulta da combinação linear da reflectância de componentes puros (endmembers), ponderados pela proporção com que ocorrem dentro de um dado pixel. O modelo de mistura permite então que seja determinada a fração de cada endmember presente no espectro de reflectância de um pixel, a partir da identificação dos componentes puros.

Diversos métodos de solução do modelo de mistura têm sido propostos. Shimabukuro e Smith

(1990) descrevem a solução pelo método dos mínimos quadrados. Esta solução tem a vantagem de permitir que o modelo seja invertido, para que, a partir do conhecimento prévio das proporções ocupadas pelos componentes puros e de uma biblioteca de espectros puros se possa simular a reflectância dos pixels de uma dada cena.

Outro método de solução do modelo de mistura é descrito por Smith et al. (1985) e se baseia na determinação das componentes principais. A limitação deste método é que ele pode ser apenas invertido a partir das frações determinadas pelo próprio modelo, não permitindo a simulação da reflectância de pixels a partir do conhecimento prévio das proporções.

A maior parte das aplicações das duas soluções do modelo de mistura tem sido com o objetivo de determinar abundâncias de minerais e rochas ou os componentes da vegetação (vegetação senescente, estágios de crescimento, etc.). Gillepe et al. (1990) apresenta uma extensa revisão das aplicações do modelo de mistura a estudos geológicos. Shimabukuro (1987) apresenta extensa discussão sobre aplicação destes modelos aos estudos da cobertura vegetal.

A primeira tentativa de se utilizar o modelo de mistura para a determinação dos componentes opticamente ativos na água encontra-se descrita em Mertes (1990) que utilizou a solução do modelo de mistura pelo método das principais componentes. Nesse trabalho, foram utilizados espectros de laboratório para decompor a radiância de imagem TM/Landsat e determinar a concentração de sedimentos em suspensão na água

do rio Amazonas, a partir de uma curva de calibração que relacionava a concentração de sedimento em mg/l, à abundância com que o espectro de uma dada concentração conhecida (endmember) estava presente no espectro de reflectância de uma suspensão com concentração desconhecida. A ausência de dados de campo coletados simultaneamente aos dados de satélite fazem com que a adequação do modelo não possa ser totalmente apreciada.

Uma rápida revisão dos trabalhos publicados sobre aplicações de dados AVIRIS (Green, 1990; Green, 1991; Green, 1992) indica que as várias versões do modelo de mistura vem sendo utilizadas na interpretação de imagens. Bibliotecas de espectros de absorção de diferentes componentes da água têm sido testadas como dados de entrada em modelos simplificados de transferência radiativa na água para gerar endmembers que possam ser utilizados em algoritmos de mistura (Pillorz e Davis). Estes espectros teóricos, entretanto, não reproduzem fielmente o espectro de reflexão da água porque se baseiam em medidas aproximadas das propriedades ópticas inerentes.

Neste trabalho, um modelo linear de mistura baseado na solução das frações pelo método das componentes principais, estará sendo avaliado como um instrumento de decomposição do espectro de reflectância da água, no espectro de reflectância de seus componentes. A hipótese é de que a reflectância da água pode ser decomposta na reflectância de seus componentes a partir da determinação das frações com que os endmembers respondem pela reflectância total da água

numa dada estação limnológica. Para isto algumas pressuposições foram feitas como: 1- os componentes opticamente ativos possuem espectros de reflectância distintos; 2- existem espectros medidos que representam os componentes opticamente ativos presentes em todas as estações amostrais; 3- o espectro decomposto estaria linearmente relacionado com a concentração do componente opticamente ativo na água.

2. Materiais e Métodos

O modelo foi aplicado a espectros de reflectância da água medidos no reservatório da UHE Tucuruí em abril de 1992. Os métodos de aquisição dos dados encontram-se descritos em Steffen et al., (1993). Três endmembers foram selecionados como responsáveis pela reflectância da água do reservatório: CLT, que representa a concentração de clorofila e de feopigmentos (em micrograma por litro), TSS, que representa o total de partículas sólidas em suspensão (em miligrama por litro), e SOD, que representa a substância orgânica dissolvida.

Para facilitar a seleção dos espectros de referência (endmembers) para os três componentes, as concentrações de clorofila foram convertidas em coeficientes de absorção em 440nm (C440), a partir da utilização dos coeficientes médios de absorção específica da clorofila fornecidos por Bricaud (1979). Como espectro de referência para o endmember CLT foi selecionada a estação 5 que possui o maior coeficiente de absorção pela clorofila. Para representar o endmember SOD foi selecionado como espectro de referência a

estação 11 por apresentar o maior valor de G440 e o menor de CLT e TSS. A estação 1 foi selecionada como espectro de referência do endmember TSS por apresentar a maior concentração de TSS.

Tabela 1 - Propriedades da água em 11 estações limnológicas do reservatório de Tucuruí. CLT é a concentração de clorofila e feopigmentos em microgramas por litro; C440 é o coeficiente de absorção pela clorofila (1/m) em 440nm; TSS é a concentração do total de sólidos em suspensão em miligrama por litro; G440 é o coeficiente de absorção pelas substâncias orgânicas dissolvidas (SOD)

Estação	CLT	C440	TSS	G440
01	2.86	0.16	6.00	1.55
02	2.98	0.17	5.60	1.94
03	4.28	0.24	3.60	1.42
04	4.28	0.24	1.20	0.69
05	4.64	0.26	1.60	0.38
06	3.93	0.22	1.50	0.65
07	4.17	0.23	2.20	0.43
08	3.57	0.20	1.40	0.99
09	3.93	0.22	1.10	0.94
10	2.74	0.15	1.30	1.20
11	1.79	0.10	1.10	1.89

O modelo de mistura utilizado foi adaptado de um algoritmo baseado em Smith et al., (1985) e pode ser descrito pela equação 1:

$$R_{ki} = \sum f_j r_{ij} + \epsilon_i \quad (1)$$

onde:

R = reflectância medida numa dada estação amostral;
k = a k-ésima estação amostral;
i = o i-ésimo canal espectral;
j = o j-ésimo endmember;
f = a fração do j-ésimo endmember que contribui para a reflectância medida

na estação k;
r = reflectância do j-ésimo
endmember no i-ésimo canal;
 ϵ_i = resíduo em cada canal
espectral.

Na primeira etapa, o modelo é aplicado para determinar a fração com que cada endmember se encontra representado no espectro de uma dada estação amostral. Os dados de entrada são os endmembers e os espectros das estações amostrais.

O modelo pode ser então invertido (Adams et al., 1989) para se determinar: 1- o espectro fracional equivalente à reflectância do componente puro, a partir da multiplicação da fração de cada componente puro pelo respectivo endmember; 2- a reflectância (R_m) da estação limnológica, pela adição linear dos espectros parciais.

A R_m deverá ser igual à reflectância medida R se os pressupostos adotados pelo modelo forem cumpridos pelos dados utilizados. Estes pressupostos são: 1- a reflectância da água pode ser modelada pela combinação linear de espectros de reflectância de seus componentes puros; 2- a soma das frações dos componentes puros deve ser 1; 3- as frações devem variar entre 0 e 1; os endmembers são espectros puros.

Se um ou mais destes pressupostos for violado, o modelo não será capaz de recompor a reflectância total da estação amostral e nem permitirá uma decomposição fiel do espectro dos componentes.

Para se avaliar o desempenho do modelo de mistura, examinam-se alguns dos seus resultados, quais sejam: o desvio médio

quadrático que é expresso pela equação (2):

$$\text{RMS} = \{[\sum((R_i - R_{mi})^2)]/i-1\}^{1/2} \quad (2)$$

onde:

R_i é a reflectância medida na banda i e R_{mi} é a reflectância modelada na banda i.

A adequação do modelo pode ser avaliada a partir da inspeção das frações geradas em cada estação amostral. Teoricamente, se R for bem modelada, as frações terão valores entre 0 e 1. Se as frações estiverem fora deste intervalo, significa que os endmembers não são espectros puros, ou que estão faltando endmembers na composição do espectro, ou que existem endmembers em excesso.

Mesmo que os resultados do modelo não sejam adequados, é conveniente que se prossiga com a análise que inclui a determinação dos resíduos, ou seja, a diferença entre R e R_m .

Neste trabalho, um novo elemento estará sendo analisado, que é a correlação entre a fração do endmember em cada estação (FE) amostral e a concentração do componente por ele representado.

3. Resultados

As frações resultantes da aplicação do modelo de mistura aos dados espectrais da UHE Tucuruí no intervalo de 400 a 800nm indicaram que neste range espectral os espectros utilizados como endmembers não representam componentes puros. As frações não atendem ao requisito de estarem no intervalo entre 0 e 1. Para todos os componentes analisados

e estações amostradas os valores são muito maiores que 1 ou muito menores que zero. Entretanto, foi observada a tendência de a fração representativa da clorofila variar com a concentração de clorofila. Os coeficientes de correlação entre FE da CLT, TSS e SOD e as respectivas concentrações destes componentes nas 8 estações amostrais remanescentes encontram-se na Tabela 2.

Pela análise da Tabela 2, verifica-se que no intervalo de 400 a 800 a única correlação significativa, ao nível de 95% de confiança é entre a FE da CLT e a CLT. Mas, ao contrário do que seria esperado, esta correlação é negativa, ou seja, na medida em que a fração do espectro de uma estação explicada pelo espectro da clorofila diminui, a concentração de clorofila aumenta. Este comportamento indica que existe um outro componente da água com comportamento semelhante ao da clorofila, mas variando inversamente com ela. Este fato pode ser comprovado pela alta correlação inversa entre SOD e CLT (-0.80). Quanto maior a concentração de CLT, menor a concentração de SOD, e maior a reflectância total da água numa dada estação amostral, portanto menor a fração da reflectância "explicada" pelo espectro de clorofila. Quando a clorofila diminui, o SOD aumenta, e o efeito conjunto dos dois componentes é diminuir a reflectância da estação amostral, e com isto, aumentar a proporção com que esta é "explicada" pela reflectância do espectro de referência da clorofila.

Apesar do mal desempenho do modelo, prosseguiu-se a análise, no sentido de

determinar qual o impacto da "superestimação" e "subestimação" das frações sobre os espectros fracionais. A Figura 1 mostra o espectro das componentes puras para uma das estações amostrais. Observa-se que o espectro da CLT tem a forma típica do espectro do fitoplâncton: 1- baixa reflectância no azul relacionada a absorção pela clorofila a; 2- alta reflectância no verde relacionada a menor absorção por pigmentos e maior retroespalhamento pelas células fitoplanctônicas (Mobley, 1992); 3- um ombro na região de 675nm relacionado à absorção pela clorofila; 4- um patamar em 685nm relacionado à fluorescência da clorofila. A reflectância total da clorofila, entretanto, foi superestimada em todos os comprimentos de onda. Para compensar esta "superestimação" do espectro de reflectância da clorofila, os espectros dos demais componentes foram subestimados, uma vez que um dos pressupostos do modelo é de que a soma das frações deve ser igual a um.

Se uma das frações adota um valor maior que um, as frações restantes são forçadas pelo modelo a adotarem valores negativos. Neste caso, a recomposição dos espectros de TSS e SOD é totalmente irrealista.

Uma outra questão a ser investigada ainda, era, o de como a adição linear destes espectros fracionais se comportavam ao se computar a Rm de cada estação amostral. Para isso, o espectro medido em cada estação amostral foi comparado ao espectro residual de cada estação amostral.

A Figura 2 ilustra os resultados para a estação 2,

que é um resultado típico para a maioria das estações. O erro do espectro computado a partir das frações variou espectralmente. O modelo superestima a reflectância entre 400 e 600nm e a subestima entre 600 e 720nm. Enquanto o espectro medido apresenta reflectância entre 0 e 0.1, o espectro modelado apresenta valores de 4 a 6 vezes maiores na região entre 400 e 500nm. A análise da variação dos resíduos ao longo do espectro permitiu identificar algumas regiões para análise mais específica. 1- 400 a 500nm, em que os resíduos são negativos e elevados. O modelo superestima a reflectância porque nesta estação amostral a fração do endmember clorofila foi superestimada. Os dados da Tabela 1 ajudam a compreender este fato. Pode-se observar que o espectro selecionado para representar a clorofila, é aquele com o menor coeficiente de absorção total em 440nm (abstraindo-se a absorção pelo material particulado) e portanto com a maior reflectância na faixa azul do que a da estação 2. Esta elevada reflectância no azul faz com que a fração do espectro medido explicada pelo espectro do endmember, seja sempre superestimada. 2- 500 a 600nm, é uma região em que o resíduo diminui rapidamente em valor absoluto, aproximando-se de zero e se torna rapidamente positivo, indicando uma mudança rápida no efeito dos componentes ópticos da água sobre a sua reflectância. Nesta região, o efeito da SOM começa a diminuir exponencialmente, dando lugar ao efeito do retroespalhamento pelas células fitoplanctônicas em suspensão e pelo TSS. A partir de 550nm, (mínima absorção pela CLT e pela matéria orgânica dissolvida), há uma mudança

rápida na magnitude e sinal dos resíduos, que se tornam positivos. 3- 600 a 700nm, é uma região de resíduos negativos. As frações negativas de SOM e TSS começam a ter maior peso no cômputo do espectro total da água porque nesta região não há diferença entre a magnitude dos espectros. 4- 700 a 800nm, representa uma região em que espectros dos três endmembers não apresentam nenhuma feição de absorção importante.

Com base nesta análise, subconjuntos de dados espectrais foram submetidos ao modelo de mistura. Os resultados mais significativos encontram-se resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Correlação entre concentração de componentes opticamente ativos e a FE do espectro de 8 estações amostrais

Intervalo espectral	TSS	CLT	SOM
400 - 800	-0.09	-0.73	-0.60
400 - 500	-0.84	-0.17	-0.76
500 - 600	0.98	0.47	-0.67
600 - 700	0.96	0.76	0.13

Observa-se que na região de 400 a 500nm, a FE de TSS se correlaciona negativamente com a concentração do TSS, a FE de CLT não se correlaciona com a CLT, e a FE de SOM se correlaciona negativamente com a SOM. No intervalo de 500 a 600nm, entretanto, a FE de TSS está alta e positivamente correlacionada com o TSS porque é a região em que a presença de SOM não afeta significativamente o comportamento espectral da água. As FEs de TSS e de CLT na região entre 600 e 700nm estão relacionadas positivamente

te com a concentração de TSS e resumidos na Tabela 3.
de CLT.

A Figura 3 apresenta a R medida e a Rm no intervalo de 500 a 600nm. Neste caso, a fração de TSS atende ao pressuposto e está no intervalo entre 0 e 1, mas a fração de CLT ainda está superestimada. Por isto, o residuo na recomposição do espectro é ainda bastante elevado. Outro aspecto que contribui para que o erro seja elevado é que o componente TSS representa partículas totais em suspensão, que incluem partículas orgânicas, as quais incluem as células do fitoplâncton. Portanto, o endmember TSS não é um endmember puro, fazendo com que os resultados do modelo violem os pressupostos teóricos.

Apesar de o modelo linear de mistura não ter sido aplicado com êxito aos dados espectror radiométricos disponíveis para a UHE Tucuruí, ele produziu um conjunto de informações interessantes sobre o comportamento espectral da água e de seus componentes.

Dentre as informações novas, cabe destacar a importância da região entre 600 e 700nm para a quantificação da clorofila em ambientes com alta concentração de matéria orgânica dissolvida. Devido à elevada absorção pela água, esta região do espectro não tem sido contemplada como importante para o estudo de corpos d'água. Trabalhos recentes (Gitelson, 1992, Dekker et al., 1992) entretanto, têm sugerido a importância desta área no estudo de águas continentais eutróficas. Os índices de Gitelson (1992) foram aplicados aos dados de Tucuruí e os resultados encontram-se

Tabela 3 - Coeficiente de correlação entre os índices para a quantificação de clorofila e a concentração de clorofila no reservatório de Tucuruí

Índices	CLT
G1	0.795241
G2	-0.107178
G3	0.795241
G4	-0.786773

$$\begin{aligned} G1 &= (Mred - mred)/mred \\ G2 &= (Mred - mred)/Mgreen \\ G3 &= Mred/mred \\ G4 &= Mred/Mgreen \end{aligned}$$

onde:

Mred = máxima reflectância na faixa do vermelho

mred = mínima reflectância na faixa do vermelho

Mgreen = máxima reflectância na faixa do verde.

Pode-se observar que existe uma correlação positiva e alta entre a diferença de reflectância normalizada na faixa do vermelho (G1) e a concentração de clorofila, porque nesta faixa ocorrem dois processos importantes: a absorção em 675 e a fluorescência em 685nm. A fluorescência pela clorofila é proporcional à concentração. Portanto, em lagos eutróficos, com altas concentrações de clorofila, o sinal produzido pela fluorescência será significativo, a ponto de ser detectável por sensores passivos. Em águas oligotróficas, onde as concentrações típicas não excedem a 1 miligrama por litro, a emissão em 685nm não é suficientemente elevada para que possa ser detectada por um

sensor remoto. Outro aspecto interessante, é que nessa região o efeito da matéria orgânica dissolvida é mínimo, e portanto ela não interfere na detecção da clorofila. O efeito do material particulado é diminuir a intensidade da banda de absorção da clorofila em 675 e aumentar o sinal na região de 685 devido ao espalhamento. Estes efeitos contrários se compensam, tornando possível sua utilização para a quantificação da CLT.

Finalmente, os resultados da aplicação do modelo de mistura em Tucuruí apontam para a necessidade de mais pesquisas neste campo. Um aspecto fundamental é o de determinar até que ponto espectros "in situ" podem ser utilizados como endmembers em modelos de mistura. Outro aspecto é o da necessidade de uma melhor caracterização das propriedades da água "in situ". Atualmente os componentes opticamente ativos são agrupados em três ou quatro categorias. A separação dos componentes em entidades mais homogêneas, e a caracterização espectral dessas entidades poderá auxiliar bastante na definição dos endmembers mais adequados.

Independentemente dos resultados que se possa ter com a aplicação do modelo de mistura, ele se constitui num instrumento analítico poderoso, que pode ser aplicado aos dados disponíveis.

4. Conclusões

Os resultados permitiram concluir que o critério adotado para definir os espectros de referência do reservatório de Tucuruí não foi adequado, visto que os espectros selecionados não representam espectros puros

dos componentes.

Os resultados indicam também que esta é uma dificuldade a ser encontrada sempre que se utilizarem espectros medidos "in situ" em regiões tropicais onde via de regra existem dois ou mais componentes opticamente ativos na água, simultaneamente.

Apesar destes problemas, a análise dos resultados produzidos pelo modelo de mistura aplicado ao intervalo de 400 a 800nm permitiu a identificação de regiões espectrais com maior potencial de discriminação daqueles componentes.

Os resultados do modelo também colocam em evidência a importância de dados espectrorradiométricos de alta resolução para o estudo de sistemas aquáticos tropicais e desperta para a necessidade da substituição de sistemas como o TM/Landsat por espectrorradiômetros imageadores.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a National Aeronautics and Space Administration, ao programa Amazonia/INPE pelo suporte financeiro, às Centrais Elétricas do Norte, ELETRONORTE, pelo suporte ao trabalho de campo realizado em abril de 1992. Este trabalho foi realizado no Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, em Pasadena, California. Evelyn Márcia Novo também agradece a Mike Hamilton, Mary Gastil e Moacir Godoy Jr. pela ajuda na implementação do modelo de mistura.

6. Bibliografia

- Adams, J.B., Smith, O.M., Gillespie, A. R., Simple models for complex natural resources: a strategy for the Hyperspectral Era of Remote Sensing. IGARSS'89, Procedures, Vancouver, Jul 10-14, 1989 Volume 1, p:16-21, 1989.
- Braga, C. Z. F. Utilização de imagens dos satélites Landsat-5 e NOAA-6 na identificação de parâmetros físico-químicos da água da Baía da Guanabara. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, dez, 1988, 115 p. (INPE 4761-TDL/349).
- Bricaud, A. Absorption, diffusion (et retrodiffusion) de la lumière per les substances influent sur la couler des eaux de, er. Universite Pierre et Marie Curie, Paris II, 1979.
- Carder, K. L.; Hawes, S. K.; Baker, K. A.; Smith, R. C.; Steward, R. G.; Mitchell, B. G. Reflectance Model for Quantifying Chlorophyll a in the Presence of Productivity Degradation Products. Journal of Geophysycal Research, 96 (11): 20599-20611, 1991.
- Dekker, A. G.; Malthus, T. J.; Wijnen, M. M. and Seyhan, E. The effect of spectral bandwidth and positioning on the spectral signature analysis of inland waters. Remote Sensing of Environment, 41; 211-225, 1992.
- Chen, Z.; Hanson, J. D.; Curran, P. J. The form of the relationship between suspended sediment concentration and spectral reflectance: its implications for the use of Daedalus 1268 data. International Journal of Remote Sensing 12 (1) 215-222, 1991.
- Gallie, E.; Murtha, P. A. Specific Absorption and Backscattering Spectra for Suspendend Minerals and Chlorophyl-a in Chilko Lake, British Columbia. Remote Sensing of Environment 39: 103-118, 1992.
- Gillespie, A. R.; Smith, M. O.; Adams, J. B.; Willis, S. C.; Fisher, A. F. III, Sabol, D. E. Interpretation of Residual Images: spectral mixtures analysis of AVIRIS images. Owens Valley, CA. Proceedings of the Second Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. June 4-5, 1990. JPL Publication (90-54), p. 243-270.
- Gitelson, A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, pp. 3367-3373, 1992.
- Gordon, H. R.; Morel, A. Remote assessment of ocean color for interpretation of the satellite visible imagery: a review. Spring Verlag, New York, 1983, p. 114.
- Green, R. O. (Ed) Proceedings of the Second Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. June 4-5, 1990. JPL Publication (90-54), p. 279.
- Green, R O. (Ed) Proceedings of the Third Airbone Visible/Infrared Imaging

- Spectrometer (AVIRIS) Workshop, May 20-21, 1991. JPL Publication (91-28), p. 325.
- Green, R. O. (Ed) Summaries of the Third Annual JPL Airbone Geoscience Workshop, June 1-5, 1992. JPL Publication (92-14), Vol. 1, p. 159.
- Kirk, J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, p. 135-137, 1986.
- Mantovani, J. E. Comportamento espectral de algas cianofíceas em diferentes concentrações na água e na presença de diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida e/ou material inorgânico em suspensão. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações, INPE, São José dos Campos, 1992 (no prelo).
- Mertes, L. A. K. Hydrology, hydraulics, sediment transport and geomorphology of the central amazon floodplain. Tese de Doutorado submetida à University of Washington, 1990.
- Mobley, C. D. The optical properties of water. In (Bass, M. ed.) Handbook of Optics, McGraw-Hill Book Co., New York, 1992 (in press).
- Novo, E. M. L. M.; Braga, C. Z. F. Segundo relatório de atividades do projeto Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos - processo FAPESP GEOLOGIA 88/4016-5, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.
- Novo, E. M. L. M.; Hansom, J. D.; Curran, P. J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. International Journal of Remote Sensing 10 (7): 1283-1289, 1989.
- Pillorz, S. H.; Davis, C. O. Spectral decomposition of sea surface reflected radiance. IGARSS 1990, Proceedings, V. 1, p. 345-348, IEEE, 1990.
- Shimabukuro, Y. E. Shade images derived from linear mixing models of multispectral measurements of forested area. Tese de doutoramento, Department of Forest and Wood Science, Fort Collins, 1977.
- Shimabukuro, Y. E.; 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 (1), January, 1991.
- Smith, M. O.; Johnson, P. E.; Adams, J. B. Quantitative determination of mineral abundances from reflectance spectra using principal components analysis. Journal of Geophysical Research. Vol.90: C797-C804, 1985.
- Steffen, C. A.; Costa, M. P.; Gama, F. F. Spectral reflectance of the Tucuruí Reservoir Waters, Brazilian Amazonia, SPIE Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment, abril, 14-21, Orlando, 1993.
- Witte, W. G.; Whitlock, C. H.; Harris, R. C.; Usry, J. W.; Poole, L. R.; Houghton, W. M.; Morris, W. D.; Gurganus, E. A. Influence of dissolved organic materials on turbid

water optical properties and remote sensing reflectance. Journal of Geophysical Research, 87 (C1): 441-446, Jan. 20, 1982.

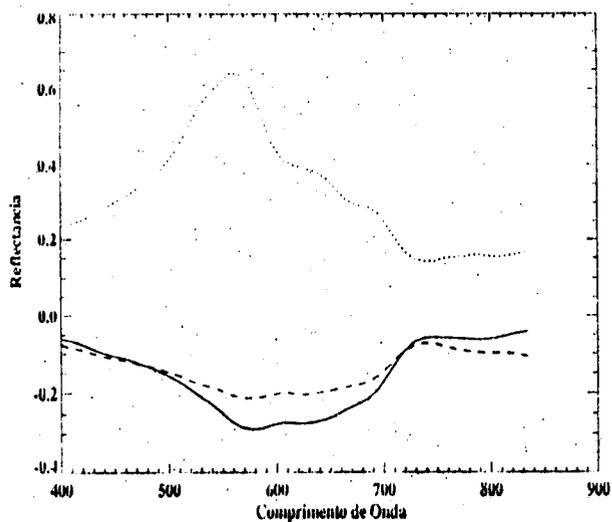


Figura 1: Espectro de reflectância fracional da CLT (pontilhado), do TSS (linha sólida) e da SOM (tracejado) na estação limnológica 2. Comprimento de onda em nanômetro.

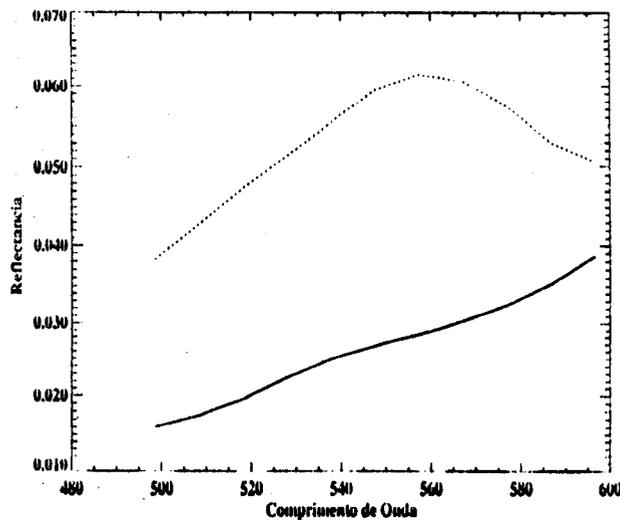


Figura 3: Espectro de reflectância total da água na estação limnológica 2: medido (linha sólida) e modelado a partir dos espectros fracionais (pontilhado) resultantes da aplicação do modelo de mistura ao intervalo espectral de 500 a 600nm.

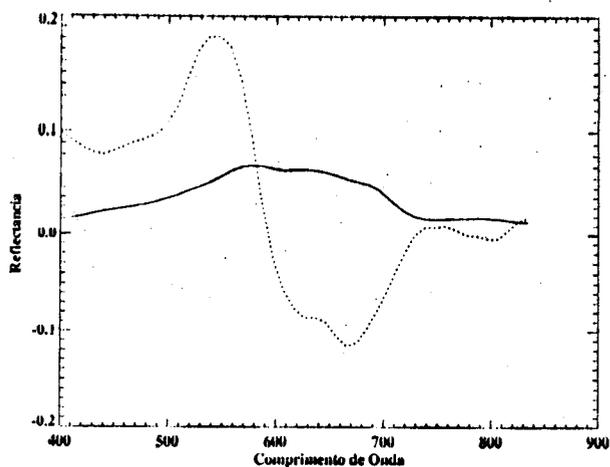


Figura 2: Espectro de reflectância total da água na estação limnológica 2: medido em campo (linha sólida) e modelado a partir dos espectros fracionais (pontilhado) resultantes da aplicação do modelo de mistura a dados espectrais no intervalo de 400 a 800nm.