

Estimativa da Concentração Superficial de Clorofila no Lago Mono
(Mono Lake-CA) a Partir de Dados do Espectrorradiômetro
Imageador AVIRIS

EVLYN MARCIA LEÃO DE MORAES NOVO¹
MARY GASTIL²
JOHN M. MELACK²

¹Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology
California - USA

²Department of Biological Sciences and Marine Science Institute
University of California, Santa Barbara, CA 93106

Resumo. Este trabalho foi realizado através de cooperação científica entre a University of California, Santa Barbara e o Jet Propulsion Laboratory com o objetivo de desenvolver algoritmos que permitam estimar a concentração superficial de clorofila a partir de dados espectrorradiométricos obtidos pelo Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). O sistema AVIRIS é um sensor que adquire dados radiométricos em 224 bandas (219 bandas efetivas) na região do espectro compreendida entre 395nm e 2450nm, com uma resolução espectral de 9,6nm. A uma altura de vôo de 20km, o sistema AVIRIS, a bordo da aeronave ER-2 da National Aeronautics and Space Administration (NASA) permite o imageamento de faixas do terreno de 614 pixels com uma resolução espacial nominal de 20m por 20m. O sistema AVIRIS foi desenvolvido primeiramente para o estudo de alvos de interesse geológico e agrícola, os quais se caracterizam pela alta reflectância. Apenas a partir de 1989 é que o sensor teve sua razão sinal/ruído aumentada ao ponto de tornar viável sua aplicação ao estudo de sistemas aquáticos, caracterizados pela baixa reflectância. Neste trabalho foram utilizados dados do sensor AVIRIS coletados em 30 de setembro de 1991 sobre o Mono Lake concomitantemente à aquisição de amostras d'água em 14 estações limnológicas. Os dados do sensor AVIRIS foram submetidos a dois tipos de pré-processamento: 1- calibração radiométrica; 2- e remoção de "dark current". A calibração radiométrica foi feita a partir de arquivos de calibração em laboratório fornecidos pelo JPL. Na remoção de "dark current" foram utilizados dois métodos: médias móveis e média para a cena. As imagens calibradas foram então submetidas a correção atmosférica e convertidas em reflectância. Para cada estação limnológica extraiu-se o espectro de uma área envolvente de 5 por 5 pixels. Os espectros das estações limnológicas com concentrações extremas de clorofila foram respectivamente subtraídos para se selecionar a região do espectro efetivamente útil para a detecção de clorofila. Os dados espectrais e de campo foram

submetidos à análise estatística de modo a identificar que bandas e/ou combinação de bandas produz o melhor modelo para quantificar a concentração superficial de clorofila. Os resultados demonstraram que o desempenho dos modelos é altamente dependente do tipo de método utilizado para a remoção da "dark current".

Abstract. This study was performed through scientific cooperation between the National Institute for Space Research (INPE), Brazil, the Jet Propulsion Laboratory (JPL) and the University of California at Santa Barbara with the objective of deriving algorithms for chlorophyll retrieval from Airbone Visible and Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data. AVIRIS data were acquired in 224 wavebands with a nominal spectral resolution of 9.6nm (219 effective bands) in the region between 395 and 2450 nm. At a flight height of 20km, the data have a ground resolution of 20m by 20m, covering a swath of 620 pixels. The system was first developed to study mineral and plants, which are characterized by high reflectance. Since 1989, the signal-to-noise ratio (SNR) has been at a level which should allow for studies of water. In the present study AVIRIS data collected over MONO LAKE during the September 30 flight concurrently to water sampling at 14 limnological stations are being examined. AVIRIS data were submitted to two types of pre processing: 1- radiometric calibration; 2- dark current removal. The radiometric calibration was performed using laboratory data produced by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. The dark current subtraction was performed using two different methods: a moving average and an average for the whole scene. The calibrated images were then atmospherically corrected and transformed into reflectance. Linear correlation and regression techniques were applied to assess the suitability of the various bands and bands ratios to derive CHL algorithms.

1. Introdução

O sistema AVIRIS é um sensor aerotransportado que permite a aquisição de dados com alta resolução espacial em 224 bandas espectrais. Ele possui quatro espectrômetros operando entre 395nm e 2500nm. Devido à superposição entre a faixa de operação dos espectrorradiômetros, o número efetivo de bandas é 219 (Vane, 1988).

O sensor AVIRIS operou pela primeira vez em 1987. Desde esta época, tanto o instrumento quanto os dados tem sido submetidos a aperfeiçoamentos para que atinjam às

especificações da comunidade científica. A partir de 1989, a razão sinal/ruído (RSR) tornou-se suficientemente alta de modo a encorajar o teste de instrumento para o estudo de corpos d'água. Desde então, os dados AVIRIS têm sido sistematicamente obtidos em vários sistemas aquáticos tais como a baía de Monterey, CA (Pillorz e Davis, 1990a,b), Mono Lake, CA (Melack e Pilorz, 1990; Melack e Gastil, 1992), lago Tahoe, CA (Hamilton et al., 1993), baía de Tampa, FL (Carder, 1992).

Os estudos realizados com os dados AVIRIS coletados em

sistemas aquáticos concentram-se nos seguintes aspectos: 1 - teste de métodos que permitam analisar a composição do espectro de reflexão da água em termos da concentração de seus componentes ópticamente ativos (Pillorz e Davis, 1990a); 2 - aquisição "in situ" de dados de refletância espectral da água para serem utilizados no desenvolvimento e teste do desempenho de modelos de mistura; 3 - teste de métodos de correção atmosférica; 4 - avaliação da capacidade dos dados em fornecer informações sobre as variações sazonais das propriedades da água (Melack e Gastil, 1992).

A região de Mono Lake tem sido utilizada como área teste para a avaliação de dados AVIRIS desde 1989. O lago Mono encontra-se na transição entre a grande bacia desértica e a província de Serra Nevada, a uma altitude de aproximadamente 2.000m. O lago recebe pouca precipitação e seu volume depende basicamente da fusão das neves nas regiões serranas. Desde 1941, a água da bacia endorreica do Lago Mono vem sendo desviada para o abastecimento de Los Angeles, o que tem provocado redução do nível da água. As consequências ecológicas destas modificações do nível d'água fizeram do Mono Lake um sistema aquático extremamente interessante como área teste. Ele apresenta variações significativas na concentração de clorofila ao longo do ano, permitindo portanto, avaliar a adequação dos dados AVIRIS para detectar tais variações e mapeá-las.

Os primeiros estudos realizados com dados AVIRIS na região de Mono Lake, devido à pequena RSR, limitaram-se à aplicação de algoritmos desenvolvidos para o Coastal

Zone Color Scanner (CZCS) para quantificar a concentração superficial de clorofila. De acordo com os autores (Melack and Pillorz, 1990) concentrações estimadas representaram metade das concentrações medidas. As razões para as discrepâncias podem ser atribuídas aos seguintes fatores: 1 - os algoritmos do CZCS foram desenvolvidos para águas do Caso I, que se caracterizam por concentrações médias menores do que aquelas encontradas no lago, exigindo portanto a determinação de novas constantes de proporcionalidade; 2 - as bandas utilizadas pelo algoritmo do CZCS (520nm e 550nm) podem não ser as mais adequadas ao estudo de águas continentais eutróficas; 3 - a baixa refletância de um lago eutrófico exigiria uma melhor RSR de modo a distinguir variações na concentração de clorofila.

Neste trabalho o efeito destes fatores sobre as discrepâncias entre clorofila estimada através de dados AVIRIS foram avaliados, bem como o efeito dos ruídos decorrentes do método de remoção da "dark current".

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

O lago Mono tem aproximadamente 150km², e uma profundidade média de 17m. É um lago hipersalino e se localiza a leste de Serra Nevada, California (38°N, 119°W). É um lago dominado por fitoplâncton caracterizados por células pequenas e por concentrações de clorofila variando entre 1.0 e 6.0 microgramas por litro (Melack and Pillorz, 1990).

2.2. Os Dados

A imagem AVIRIS utilizada neste estudo foi adquirida em 30 de setembro de 1991, simultaneamente à coleta de 14 amostras de água, integradas da superfície até 2 metros de profundidade para a determinação de clorofila a. Os métodos de determinação encontram-se descritos em Melack e Pillorz, (1990).

O processamento digital da imagem AVIRIS consistiu em transformar os níveis digitais em radiância a partir dos arquivos de calibração fornecidos pelo Jet Propulsion Laboratory. A conversão dos valores de radiância da água (L) em reflectância do volume d'água (Rv) foi realizada a partir da utilização do modelo de correção atmosférica Lowtran-7 (Kneysys et al., 1988). As seguintes variáveis foram determinadas através do Lowtran-7: a- a radiância espectral (L6) de uma superfície com albedo igual a 6% (assumindo-se que esta seria equivalente à máxima radiância encontrada sobre um corpo d'água) observada à altura da aeronave; b- a radiância espectral de uma superfície com albedo de 100% (para simular a radiância de uma placa de sulfato de bário observada à altura da aeronave (L100)); c- a radiância da atmosfera para uma superfície de com albedo de 100% (La100); d- a radiância da atmosfera para uma superfície com albedo de 6% (La6) e a radiância da atmosfera para uma superfície com albedo de 0% (La0).

Estas variáveis permitiram determinar o valor da Rv segundo dois diferentes métodos. O primeiro método é expresso pela equação 1:

$$Rv1 = (LA - La0 - Ld - Lb) / (L100 - La100) \quad (1)$$

onde:

Rv1=reflectância do volume d'água (método 1);

LA=radiância medida pelo sensor AVIRIS (média de uma janela de 5 por 5 pixels, em torno de cada estação amostral.

La0=radiância da atmosfera para uma superfície com albedo de 0%

Ld=radiância devida à reflexão da radiação solar difusa refletida na superfície da água.

Lb=radiância proveniente dos pixels vizinhos (background).

O valor de Ld foi determinado através da equação 2:

$$Ld = (L6 - La6) / 3 \quad (2)$$

uma vez que a radiância da superfície d'água representa 2% da radiância total da água corrigida do efeito atmosférico. O valor de Lb foi determinado pela equação 3:

$$Lb = (La6 - La0) / 6 \quad (3)$$

que representa a contribuição dos pixels adjacentes para a radiância de um dado pixel.

O segundo método de correção atmosférica é expresso pela equação 4:

$$Rv2 = [LA - La0 - (Lb \times Rv1 \times 100) - Ld] / (L100 - La100). \quad (4)$$

O segundo método utiliza a Rv determinada no primeiro método para modular a radiância dos pixels vizinhos. Assim, o

valor da radiância adicionada devido à energia proveniente dos pixels vizinhos não é mais constante para toda cena, mas varia com a reflectância de cada pixel.

Os valores de Rv1 e Rv2 foram determinados para todas as bandas do AVIRIS no intervalo de 400 a 800 nm, que é a região do espectro de interesse para o estudo dos corpos d'água.

O relacionamento entre a reflectância da água e a concentração de clorofila em cada estação amostral foi quantificado através do coeficiente de correlação de Pearson (Montgomery e Peck, 1987). Para avaliar a consistência das correlações foram selecionados diversos subconjuntos de amostras. A hipótese subjacente foi a de que se os ruídos fossem uniformes em toda a cena, as correlações entre reflectância e concentração de clorofila seriam constantes em todos os subconjuntos, uma vez que o lago se apresentava opticamente homogêneo.

A análise dos resultados das correlações permitiu selecionar o melhor conjunto de dados espectrais para gerar um modelo empírico que permitisse estimar a concentração superficial de clorofila no lago Mono para a imagem de 30 de setembro de 1991.

3. Resultados

Os métodos de correção atmosférica e determinação de Rv apresentaram resultados semelhantes. Ambos produziram valores negativos de reflectância a partir de 620nm, indicando a necessidade de um conhecimento mais preciso da

variação espectral do albedo da água. Com o uso de um valor constante de albedo para todo o espectro, a radiância da atmosfera é superestimada nas regiões de maior absorção da água, resultando em valores negativos. Este problema está sendo presentemente contornado a partir da aquisição simultânea de espectro da água "in situ", conforme método sugerido por Carder (1992). As imagens AVIRIS adquiridas em 1992 já poderão ser corrigidas através de novo método, uma vez que foram coletados dados radiométricos de campo simultaneamente à aquisição das imagens.

Apesar da incerteza associada à correção atmosférica nas regiões de absorção da água, os espectros resultantes apresentaram sensibilidade às variações de clorofila (Figura 2) principalmente entre 450 e 580nm. As diferenças de reflectância, entretanto, variam entre 0.001 e 0.005, ou seja, de 0.1 a 0.5% (Figura 3).

Embora recentemente tenha sido demonstrada a importância da região entre 600 e 800nm para a determinação de clorofila em lagos eutróficos (Giltelson, 1992; Novo, 1993), neste estudo, devido à incerteza associada à correção atmosférica entre 620 e 800nm, foram selecionadas apenas 19 bandas compreendidas entre 439nm e 616nm para a análise estatística.

De modo a avaliar a sensibilidade do relacionamento entre clorofila e reflectância ao método de correção atmosférica, calculou-se o valor do coeficiente de correlação (r) para Rv1 e Rv2. A Tabela 1 resume os resultados.

A análise da Tabela 1 confirma a inspeção visual dos espectros, comprovando que os métodos de correção atmosférica não alteram significativamente os resultados (95% de significância). Os dados também indicaram não haver correlação significativa entre a concentração de clorofila e a reflectância das bandas individuais. A inspeção visual de algumas bandas indicou a falta de homogeneidade na radiância com a presença de ruídos. Para reduzir estes problemas foram utilizadas razões entre bandas. As demais análises se limitaram a partir disto à Rv1.

Para se testar a homogeneidade da cena em relação ao ruído, foram selecionados 6 subconjuntos amostrais contendo 7 amostras cada: 1 - subconjunto 1, incluindo apenas as amostras ímpares; 2 - subconjunto 2, incluindo apenas as amostras pares; 3 - subconjunto 3, incluindo amostras paralelas à linha de varredura; 4 - subconjunto 4, incluindo amostras perpendiculares à linha de varredura; 5 - subconjunto 5, incluindo apenas uma amostra paralela à linha de voo, 6 - um subconjunto incluído todas as amostras. Foram rodadas correlações entre Rv1 e Cc para todos os conjuntos. Foram também rodadas correlações entre razões entre bandas e Cc para todos os subconjuntos. Estabeleceu-se como critério para a aceitação da correlação entre as variáveis (tendo em vista o número de amostras e o nível de significância de 95%), que seriam aceitas correlações que produzissem um coeficiente de determinação de 70%.

A análise das correlações para

os dois primeiros subconjuntos de amostras indicou que para o subconjunto de amostras pares houve correlação significativa entre Cc e Rv em apenas três bandas espectrais ($-0.91 < r < -0.81$), mas para o subconjunto de amostras ímpares Rv não houve banda correlacionada. Este comportamento seria compreensível se houvesse heterogeneidade nas propriedades ópticas do lago. Entretanto, um teste de médias indicou com 95% de confiança que a distribuição de clorofila no lago pertence à uma mesma população. Portanto, o fator a afetar a correlação é a presença de ruídos. Analisando-se a distribuição das amostras de cada um destes subconjuntos constatou-se que as amostras ímpares estavam na sua maioria distribuídas perpendicularmente à linha de varredura, portanto mais sujeitas à oscilações no desempenho dos detetores ao longo da linha de voo. A presença de ruídos coerentes já havia sido detectada na imagem de 1989 (Melack e Pillorz, 1990). Um procedimento padrão para reduzir os ruídos da cena, é se trabalhar com as razões entre as bandas espectrais. Os resultados das correlações entre Cc e as razões de banda para as duas subamostras foram surpreendentes: apenas uma razão entre bandas apresentou correlação significativa para o subconjunto de amostras pares. Para o subconjunto de amostras ímpares seis razões entre bandas apresentaram correlações significativas. Os resultados para os subconjuntos amostrais 1 e 2 encontram-se resumidos na Tabela 2.

Os resultados das análises de correlação para os dois primeiros subconjuntos indicam que os valores de reflectância variam de dois modos: 1 - numa mesma banda, a reflectância é

afetada por oscilações do detector ao longo da linha de vôo; 2 - as variações nos detetores no tempo não são espectralmente correlacionadas, fazendo com que em certas regiões da imagem as razões entre bandas sejam eficientes para reduzi-las, mas em outras regiões provoquem maior degradação da cena.

A análise das correlações entre Cc e Rv para os demais conjuntos amostrais (Tabela 3) confirmam esta tendência. Em função dos diferentes subconjuntos amostrais utilizados para gerar as correlações, o conjunto de variáveis espectrais relacionadas à clorofila se modifica, tornando a previsão da sua concentração em superfície bastante sujeita a erros.

Os resultados preliminares da análise estatística dos dados extraídos da imagem AVIRIS de 30 de setembro indicam que as variações de reflectância não se encontram inequivocadamente relacionadas à concentração de clorofila, e que a presença de ruídos é o principal fator limitante ao seu bom desempenho. Apesar destas limitações o exame dos resultados de todos os subconjuntos de dados, incluindo o de todas as amostras, indicou que existe uma razão de banda, significativamente correlacionada com Cc e que é comum à maioria das subamostras. Trata-se da razão 478/567 (com r variando de -0.78 a -0.89). Por ser a razão mais consistente ela foi selecionada para gerar um modelo de previsão da concentração superficial de clorofila. O modelo resultante pode ser expresso pela equação 5:

$$Cc = 115.63 - 11.46Rr \quad (5)$$

onde:

Cc = concentração de clorofila
Rr = razão 478/567.

O valor de r^2 para o modelo foi de 76%, com um valor F de 21.03 e um erro padrão de estimativa de 0.49mg/m³. Este modelo foi aplicado a todos os subconjuntos para avaliar o erro padrão de estimativa para cada um deles. A Tabela 4 resume estes valores.

Modificações no método de remoção da "dark current" indicaram uma sensível redução do nível de ruído presente na imagem em algumas das bandas espectrais. Estes dados estão sendo presentemente processados e serão submetidos ao mesmo tipo de análise.

Embora o desenvolvimento de modelos empíricos já não seja bem aceito pela comunidade científica, devido à falta de suporte teórico e devido à necessidade de calibração constante (Pillorz e Davis, 1990a), a análise estatística dos dados e o teste dos modelos empíricos trouxe à luz informações novas.

Em primeiro lugar, os resultados deste estudo revelaram a presença de ruídos, presença esta muitas vezes não identificável através da inspeção visual das imagens devido ao grande número de bandas. Os resultados revelaram também que os ruídos variam de intensidade e distribuição espacial de banda para banda, o que sugere a necessidade de métodos de correção (filtros) específicos para determinadas faixas do espectro.

As razões de banda 445/550,
443/560, 443/520, 520/550

sugeridas por Gordon e Morel (1983) correspondem às razões 439/547, 439/557, 449/518 e 518/547 respectivamente. Estas razões tem sido utilizadas em algoritmos desenvolvidos para a quantificação de clorofila através de dados do CZCS. Estas bandas foram selecionadas a partir de dados ópticos e biológicos coletados em águas oceânicas do Caso 1, cujos ranges de concentração são mais baixos do que aqueles encontrados em águas continentais. Os resultados mostram que estas razões foram insensíveis a concentração de clorofila no lago Mono. As melhores razões encontradas para este lago envolvem faixas de maiores comprimentos de onda na região do azul (470nm) e do verde (577nm). Este resultado pode ser tanto um "artefato" resultante da incerteza da correção atmosférica como pode ser devido às maiores concentrações de clorofila. Resultados recentes apresentados por Gitelson (1992), entretanto indicam que, em lagos eutróficos, as faixas espectrais mais sensíveis à variação de clorofila encontram-se na região do verde e vermelho principalmente. Com o aumento da concentração de clorofila, a absorção por unidade de concentração diminui devido ao efeito pacote (KirK, 1986). Com isso a banda azul se torna menos eficiente para discriminar variações de concentração de clorofila quando esta ocorre em altas concentrações.

4. Conclusões

Os resultados deste trabalho permitem concluir que os dados de alta resolução espectral possibilitam a identificação de bandas espectrais mais adequadas ao estudo de sistemas

aquáticos continentais caracterizados por elevadas concentrações de clorofila em superfície.

Os resultados indicam ser necessária a pesquisa de métodos para remoção de ruído que levem em conta a variabilidade da frequência espacial dos ruídos banda a banda.

5. Agradecimentos

E. M. Novo agradece à National Aeronautics and Space Administration, ao Jet Propulsion Laboratory e a University of California, Santa Barbara, pelo suporte financeiro e técnico desta pesquisa.

6. Referências

- CARDER, K. L. AVIRIS calibration and application in coastal oceanic environments. Summaries of the Third Annual JPL Airbone Geoscience Workshop. June 1-5, 1992. Volume 1. JPL Publication n 92-14, 1992.
- GITELSON, A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. International Journal of Remote Sensing, 1992(13):3367-3373.
- GORDON, H. R.; MOREL, A. Y. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery, Springer-Verlag, New York, 1983, p.114.
- GREEN, R. O.; CONEL, J. E.; CARRERE, V.; BRUEGGE; MARGOLIS, J. S.; RAST, M.;

- HOOVER, G. Determination of the In-Flight Spectral and Radiometric Characteristics of the Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Second Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. Proceedings. JPL Publication (90-54), p.1-14, 1990.
- HAMILTON, M. K.; DAVIS, C. D.; RHEA, W.J.; PILLORZ, S.H.; CARDER, K.L. Estimating chlrophyll content and bathymetry of lake Tahoe using AVIRIS data, Remote Sensing of Environment, 44:1-14, 1993.
- KIRK, J.T.O. Light and Photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, 1986.
- KNEYZYS, F.X.; SHETTLE, E.P.L.; ABREU, L.W.; CHETWYND, J.H.; ANDERSON, G.P.; GALLERY, W.O.; SELBY, J.E.A.; CLOUGH, S.A. Users Guide to LOWTRAN 7. (AFGL - TR - 88-0177), 1988
- MELACK, J.M.; PILLORSZ, S.H. Reflectance spectra from eutrophic Mono Lake, California, measured with Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Imaging Spectroscopy of the Terrestrial Environment. SPIE 1298, p.201-212, 1990.
- MELACK, J.M.; GASTIL, M. Seazonal and spatial variations in phitoplanktonic chlorophyll in the eutrophic Mono Lake, California, measured with the Airbone Visible and Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. June 1-5, 1992, V 1. (JPL Publication 92-14), p:53-56, 1992.
- NOVO, E.M.L.M. Water spectral libraries for the interpretation of image spectrometric data. Aceito para publicação no SPIE International Symposium on Optical Engineering and Photonics in Aerospace and Remote Sensing., 12-16 April, 1993, Orlando, 1993.
- MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A. Introduction to linear regression analysis. New York. John Wiley and Sons, 1982. 508p.
- PILLORZ, S.H.; DAVIS, C.O. Spectral decomposition of sea surface reflected radiance. IGARSS 1990. Proceedings, V.1, p:345-348, IEEE, 1990a.
- PILLORZ, S.H.; DAVIS, C.O. Investigation of ocean reflectance with AVIRIS data. Second Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometre (AVIRIS) Workshop, Proceedings. June 4-5, 1990 (JPL Publication 90-54), p:224-231

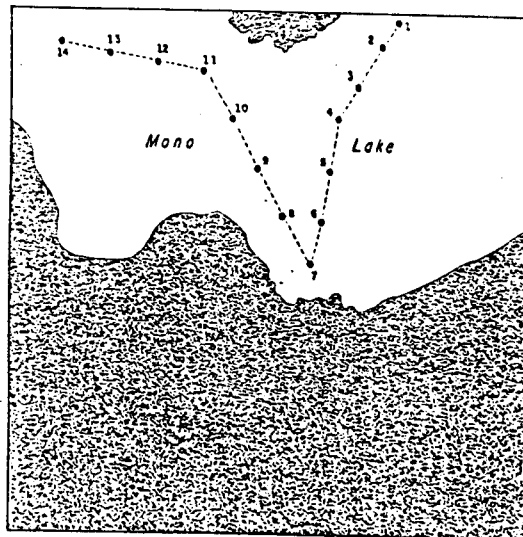


Figura 1: Localização das estações amostrais no Lago Mono.

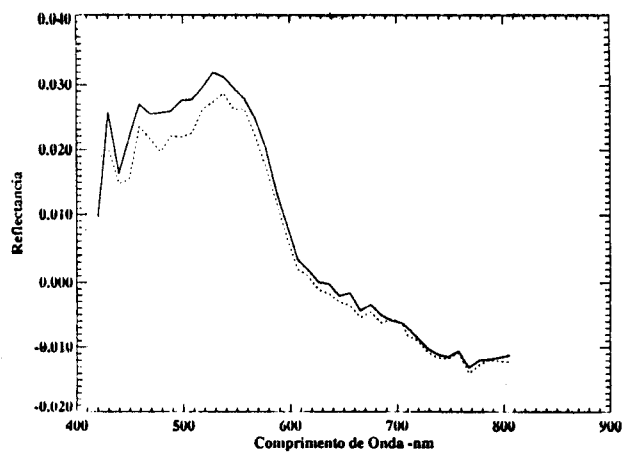


Figura 2: Espectro de reflectância das estações limnológicas em máxima e mínima concentração de clorofila no Lago Mono.

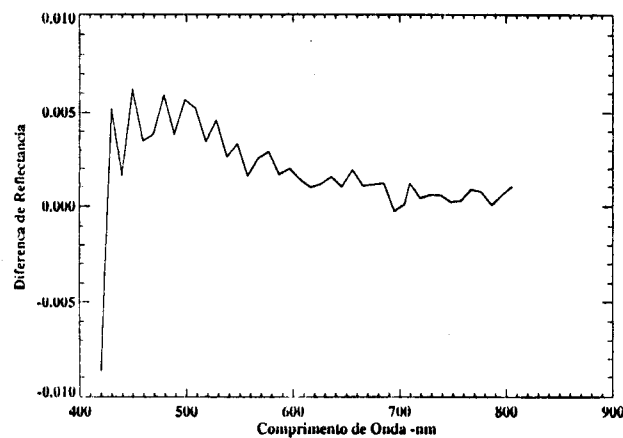


Figura 3: Espectro de diferença entre os espectros das estações limnológicas com máxima e mínima concentração de clorofila.

Tabela 1 - Coeficiente de correlação linear entre concentração de clorofila (Cc) e reflectância (Rv). Rv1 corresponde a reflectância do volume de água calculada pelo método 1, e Rv2 corresponde a reflectância do volume de água calculada pelo método 2

Bandas do AVIRIS (nm)	Rv1 vs Cc	Rv2 vs Cc
439.7	-0.35	-0.35
449.5	-0.69	-0.69
459.3	-0.62	-0.62
469.1	-0.71	-0.71
478.9	-0.78	-0.78
488.4	-0.57	-0.57
498.5	-0.63	-0.63
508.2	-0.79	-0.79
518.2	-0.68	-0.68
528.0	-0.64	-0.64
537.8	-0.58	-0.58
547.6	-0.61	-0.61
557.4	-0.45	-0.35
567.2	-0.50	-0.50
557.0	-0.57	-0.57
586.8	-0.37	-0.37
596.7	-0.50	-0.50
606.3	-0.41	-0.41
616.3	-0.45	-0.45

Tabela 2 - Correlações significativas entre Rv1 e Cc para os subconjuntos amostrais 1 e 2

Subconjunto	Razões entre bandas	r
1	478/586	-0.89
	489/447	-0.84
	508/557	-0.88
	518/567	-0.86
	528/557	-0.87
2	557/606	0.86

Tabela 3 - Correlações significativas entre Cc e Rv para os subconjuntos 4, 5 e 6

Subconjunto	Bandas	r	Razões de Bandas	r
3	449	-0.84	508/567	-0.84
	508	-0.86	537/596	-0.86
	528	-0.90	547/596	-0.84
	537	-0.85		
	547	-0.88		
	567	-0.84		
	577	-0.91		
	596	-0.89		
4			469/528	-0.93
			469/567	-0.86
			469/577	-0.85
			469/586	-0.92
			498/586	-0.94
			478/528	-0.89
			478/567	-0.89
			478/577	-0.88
5			469/528	-0.93
			469/537	-0.92
			469/547	-0.87
			469/557	-0.93
			469/567	-0.90
			469/577	-0.95
			469/586	-0.94
			478/528	-0.88
			478/557	-0.89
			478/567	-0.87
			478/577	-0.97
		478/528	-0.88	

Tabela 4 - Erro padrão da estimativa para os diferentes conjuntos amostrais

Subconjunto amostral	Erro padrão da estimativa (mg/m ³)
1	0.71
2	0.64
3	0.43
4	0.81
todas as estações	0.61