

Avaliação do sensor hiperespectral SpecTIR na discriminação de diferentes concentrações de clorofila-*a* no Reservatório de Ibitinga-SP

Rafael Damiati Ferreira
Allan Saddi Arnesen
Claudio Clemente Faria Barbosa
Evllyn Márcia Leão de Moraes Novo

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{rafael, claudio}@dpi.inpe.br; {allansa, evlyn}@dsr.inpe.br

Abstract. The discrimination of aquatic environments or compartments with different concentrations of chlorophyll-*a* may be useful for the management of water resources, optimizing eutrophication control. Until recently, available remote sensing systems did not have adequate spectral and radiometric resolution to discriminate diagnostic spectral features from chlorophyll presence in water. More recently, hyperspectral sensors have been developed more responsive to the needs of that application. Therefore, the aim of this study is to present the results of an experiment to evaluate the potential of SpecTIR sensor for the characterization of environments with different concentrations of chlorophyll-*a* at Ibitinga-SP reservoir. For this we used a spectra library provided by Londe (2008) associated with 11 classes of chlorophyll-*a* concentration ranging from 7,21 to 67.208,49 µg/L. The spectra of each pixel of SpecTIR image were then classified using the Spectral Angle Mapping technique. In this study we evaluated two spectral intervals, a broader (400 to 890 nm) and another known to contain the main features of absorption and scattering caused by the presence of phytoplanktonic pigments in water (680 to 800 nm) and cells, respectively. The results show that although both spectral ranges tested showing similar results, the region between 680 to 800 nm proves to be more suitable for the detection of large concentrations of chlorophyll and therefore, large phytoplankton biomass. The sensor SpecTIR has good ability to distinguish water masses, since it has a large number of spectral bands in interest ranges for water quality studies.

Palavras-chave: Spectral Angle Mapping, hyperspectral sensors, algal blooms, Mapeamento por Ângulo Espectral, sensores hiperespectrais, florações de algas.

1. Introdução

As populações de algas em sistemas aquáticos podem representar riscos significantes à saúde humana, uma vez que várias espécies podem produzir toxinas potentes. O monitoramento da distribuição espacial do fitoplâncton permite analisar a qualidade das águas continentais (lagos e reservatórios), podendo ser utilizado em situações emergenciais de florações de algas. A concentração de clorofila-*a* é geralmente a medida padrão da biomassa de fitoplâncton em corpos d'água, e pode ser estimada a partir de diversos algoritmos que utilizam valores de reflectância de sensores remotos (Gitelson et. al., 2008; Hunter et al., 2010).

No entanto, sensores multiespectrais oferecem limitações para a identificação de feições espectrais importantes nos estudos de qualidade da água, em função da ampla largura de suas bandas. O surgimento de sensores hiperespectrais contribuiu para o preenchimento desta lacuna, uma vez que possibilitam a realização de medidas radiométricas com bandas estreitas e contínuas (Rudorff, 2006). A utilização de sensores hiperespectrais tem apresentado bons resultados em estudos de qualidade da água, sendo interessante para o monitoramento de florações de fitoplâncton e para a estimativa dos componentes opticamente ativos (COAs) (Kallio et al., 2001; Kuster et al., 2006). Dados do sensor Hyperion do satélite EO-1, por exemplo, têm sido aplicados com sucesso na estimativa das concentrações de COAs de águas continentais e costeiras, desde que sejam executados procedimentos de pré-processamento e redução de ruídos (Brando e Dekker, 2003; Giardino et al., 2007; Rudorff et al., 2009).

Apesar da utilização de imagens orbitais para o monitoramento de grandes áreas geográficas, como lagos e reservatórios de barragens, ser mais rápida e econômica do que

análises convencionais de dados de medições *in situ*, novos sensores aerotransportados hiperespectrais reúnem as vantagens de melhores resoluções espectrais e radiométricas com aquelas relacionadas a uma melhor resolução espacial. Segundo Hirano (2003), a melhoria da resolução espacial implica em classificações mais precisas das imagens, uma vez que ocorrem menos “pixels misturados”, ou seja, que representem propriedades espectrais de mais de uma classe de interesse com apenas um número digital.

O sensor hiperespectral aerotransportado ProSpecTIR VS é um instrumento que apresenta estas características (Spectir, 2010). Para a região do visível e infravermelho próximo (400 a 970 nm), o sensor possui resolução espacial de 1 metro, espectral variável entre 2,3 e 9,2 nm e radiométrica de 12 bits, indicando ser adequado para estudos de ambientes aquáticos. Estudos recentes com aplicações de imagens SpecTIR em outras áreas do conhecimento foram realizados por Pontius et al. (2008) e Naumann et al. (2009).

O mapeador por ângulo espectral (*Spectral Angle Mapper - SAM*) é uma ferramenta que permite a identificação de semelhanças espectrais entre espectros extraídos de uma imagem e um espectro de referência, proveniente de uma biblioteca espectral (Kruse et al., 1993). O algoritmo determina a similaridade espectral através do cálculo do ângulo entre os dois espectros, considerando-os como vetores com dimensões equivalentes ao número de bandas. Uma característica importante do algoritmo é que ele não é sensível à intensidade, mas somente à forma dos espectros.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o sensor SpecTIR na discriminação de ambientes com diferentes concentrações de clorofila-*a* no Reservatório de Ibitinga-SP, através das imagens obtidas por este sensor. Para tanto, foi empregada a técnica de mapeamento por ângulo espectral, baseada na comparação entre a resposta espectral dos alvos registrada pelo sensor e as curvas espectrais de referência obtidas em campo. Foram utilizados espectros de referência para diferentes concentrações de clorofila-*a* levantados por Londe (2008). As classificações SAM foram realizadas por meio da utilização de dois intervalos espectrais distintos, visando analisar a importância da localização das bandas no mapeamento da concentração de fitoplâncton.

2. Materiais e Métodos

A área de estudo deste trabalho é o Reservatório de Ibitinga – SP, localizado na porção central do estado de São Paulo, no médio Rio Tietê, à jusante da barragem da Usina Hidrelétrica Mário Lopes Leão (Promissão), e à montante da Usina Hidrelétrica Álvaro de Souza Lima (Bariri). Cercado por áreas expressivas de cultivo de cana de açúcar e citricultura, o Reservatório recebe considerável quantidade de sedimentos orgânicos e inorgânicos das terras a seu entorno. Estas características configuram um quadro favorável à ocorrência de florações de algas (Londe, 2008).

Foram utilizadas duas faixas imageadas pelo sensor SpecTIR, aqui denominadas de A1 e A2 (Figura 1), sendo suas características reunidas na Tabela 1. A diferença de tamanho entre as áreas faixas A1 e A2 refere-se à qualidade da imagem. A cena A2 foi recortada de modo a eliminar uma área de brilho saturado, possivelmente provocado pela reflexão direta da luz do Sol.

Tabela 1. Características de aquisição das imagens SpecTIR.

	Cena	Data de aquisição	Horário	Largura da faixa imageada	Comprimento da cena	Altitude média
Imagens SpecTIR	A1	06/06/2010	11:11 am	320 m	1853 m	1178 m
	A2	06/06/2010	11:16 am	320 m	725 m	1173 m

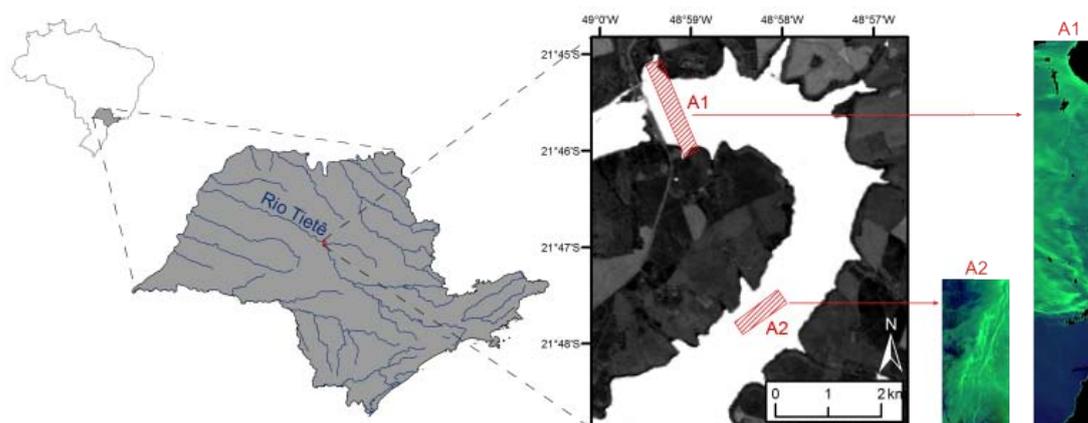


Figura 1. Mapa de localização da área estudada no Reservatório de Ibitinga/SP, com detalhe para as duas faixas imageadas (A1 e A2) em composição SpectTIR RGB: 681, 553 e 433nm.

Os procedimentos utilizados para transformar os valores de radiância das cenas A1 e A2 em ambientes distintos no tocante à concentração de clorofila encontram-se descritos no fluxograma da Figura 2.

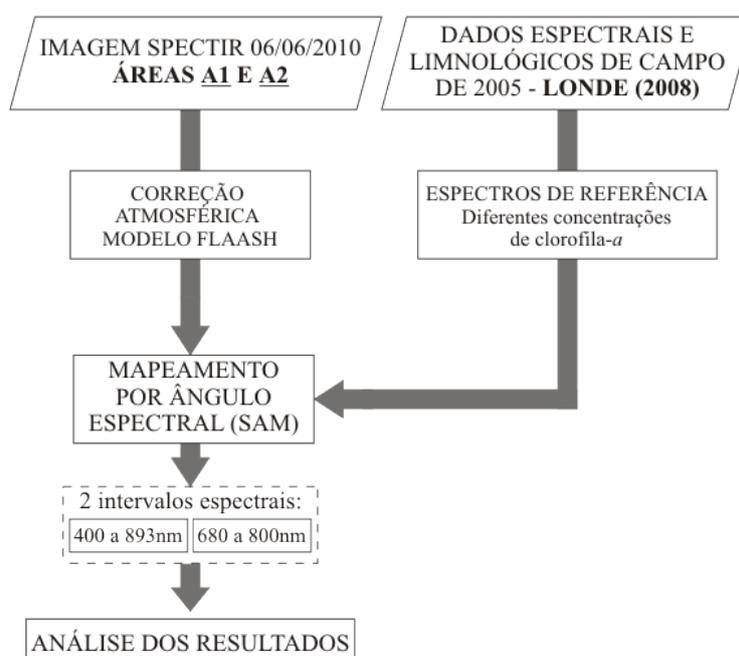


Figura 2. Fluxograma com as etapas do trabalho.

Primeiramente, foi realizada a correção atmosférica das imagens através do modelo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), implementado no aplicativo ENVI 4.7, utilizando os parâmetros de aquisição da imagem e do sensor. Para limitar o processamento das imagens às regiões espectrais de interesse ao estudo da água, foram eliminadas as bandas menores do que 400 nm e maiores que 900 nm. Em seguida foi aplicada uma máscara para restringir o processamento apenas às áreas de água.

Dados limnológicos e espectrais foram coletados por Londe (2008) no Reservatório de Ibitinga, durante o período de 24 a 28/10/2005. Para este trabalho foram selecionados pontos amostrais com diferentes concentrações de clorofila-a, cujos espectros foram posteriormente utilizados como referência à classificação. Foram estabelecidas 11 classes com as seguintes concentrações ($\mu\text{g/L}$): 7,21; 22,83; 43,04; 67,81; 117,63; 201,06; 385,65; 564,13; 938,97; 1540,92; e 67208,49.

A classificação pelo método SAM é baseada no ângulo espectral formado entre dois vetores, sendo um o espectro do pixel da imagem e o outro um espectro de referência. O grau de similaridade entre estes dois espectros determinado aplicando a Equação 1 aos dados. Se o ângulo α for menor do que um limite predeterminado, o pixel é definido como pertencente à classe de referência (Kruse et al., 1993).

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2)^{1/2} \cdot (\sum_{i=1}^{nb} r_i^2)^{1/2}} \right) \quad (1)$$

Onde: nb é o número de bandas; t é o vetor do espectro testado (pixel); e r é o vetor do espectro de referência.

Como se pode observar na Equação 1, o número de bandas é um fator considerado no cálculo do ângulo espectral e, portanto, é fundamental que o número de bandas da imagem e do espectro de referência seja o mesmo. Para tanto, a imagem SpecTIR foi reamostrada para a mesma largura de bandas dos dados espectrais levantados por Londe (2008), isto é 1 nm.

A escolha dos intervalos espectrais é fator determinante para a qualidade dos resultados do SAM, tendo em vista que a variação da concentração de clorofila-a provoca o deslocamento e a modificação das feições espectrais características deste COA. Dentre as feições diagnósticas de corpos d'água ricos em fitoplâncton (Arst, 2003; Gitelson, 1992; Rundquist et al., 1996), destacam-se: i) baixa reflectância de 400 a 500 nm, devido à absorção de pigmentos nesta região; ii) máximo de reflectância na região do verde, em torno de 550 nm; iii) mínimo de reflectância em torno de 630 nm, causado pela absorção de ficobiliproteínas; iv) mínimo de reflectância em 680 nm, devido a absorção de pigmentos fotossintetizantes, como a clorofila-a; e v) máximo de reflectância em torno de 715 nm, atribuído ao alto espalhamento por todos os COAs e alta absorção da água. Neste trabalho foram testados dois intervalos, sendo um mais amplo (400 a 893 nm) e outro em uma região reconhecida por conter feições de absorção e espalhamento causados pela presença de pigmentos fitoplantônicos na água (680 a 800 nm).

A análise dos resultados foi realizada através de três etapas fundamentais. Para avaliar a capacidade do sensor SpecTIR em identificar as principais feições de absorção dos corpos d'água ricos em fitoplâncton, realizou-se uma análise visual qualitativa dos espectros extraídos de pixels da imagem, comparando suas feições diagnósticas com as estabelecidas pela literatura para corpos d'água ricos em fitoplâncton. Na segunda etapa, foi calculada a exatidão total entre os pixels classificados para os dois intervalos (400 a 893 nm e 680 a 800 nm) para a mesma área. A exatidão consiste na soma do número de pixels classificados corretamente, ou seja, com a mesma classe para ambos os resultados, dividida pelo número total de pixels. Por fim, foram calculados os espectros médios da imagem para três classes de diferentes concentrações de clorofila-a (22,83, 117,63 e 1540,92 $\mu\text{g/L}$) e plotados juntamente com os espectros de referência levantados por Londe (2008), com o intuito de visualizar a similaridade de forma entre eles.

3. Resultados e Discussão

A Figura 3 apresenta espectros de pixels coletados na faixa A1, visando à identificação das principais feições espectrais características de corpos d'água ricos em fitoplâncton. Estas feições podem ser identificadas, principalmente, na Figura 3(b). No entanto, algumas amostras visivelmente ricas em fitoplâncton apresentaram a reflectância do pico do verde (550 nm) mais intensa do que a do infravermelho próximo (715nm), o que não é esperado para águas com elevadas concentrações deste constituinte (Figura 3(a)). Duas hipóteses podem justificar esse comportamento. A primeira diz respeito à profundidade na qual as algas estão situadas. Quanto maior a camada de água acima das algas, maior a absorção da radiação

eletromagnética no infravermelho próximo, atenuando o pico de máxima reflectância característico de águas com presença de fitoplâncton (Arst, 2003). A segunda hipótese baseia-se na ocorrência do efeito *glitter*. As condições hidrodinâmicas do Reservatório no momento da aquisição podem fazer com que o efeito de *glitter* seja integrado ao sinal detectado pelas imagens de alta resolução espacial. Como esse efeito é mais intenso na região do visível do espectro eletromagnético, decorrente da reflexão especular da luz solar, a radiação refletida torna-se mais intensa no verde, região de maior espalhamento pelas células que abrigam os pigmentos de clorofila. O teste dessas hipóteses, entretanto, só seria possível se houvessem informações de campo coletadas simultaneamente à aquisição da imagem, tais como profundidade Secchi, velocidade e direção de vento e também dados de espectrorradiometria.

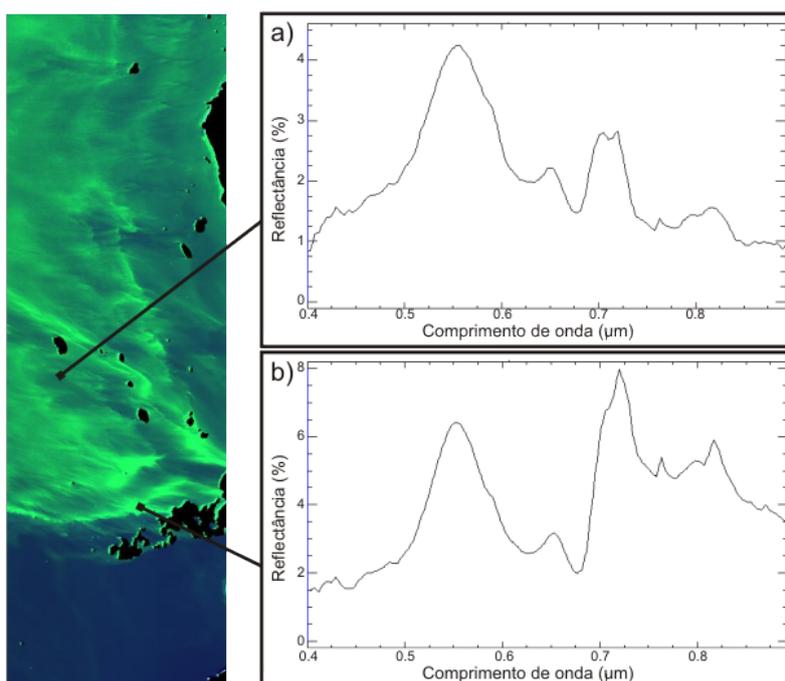


Figura 3. Curvas espectrais de duas amostras da imagem A1. O gráfico (a) apresenta menor reflectância e (b) maior, mas ambos com feições características da presença de fitoplâncton na água.

O resultado das classificações realizadas por meio do SAM para as duas áreas são apresentado na Figura 4. De maneira geral, ambas as faixas espectrais adotadas apresentam resultados coerentes. Entretanto, observa-se uma maior capacidade de discriminação de massas d'água com baixas concentrações de clorofila-*a* quando utilizada a faixa de 400 a 890 nm (Figura 4 (a) e (c)). Isto ocorre, pois massas d'água com baixa concentração de clorofila-*a* apresentam maior variação espectral na região do visível. Por outro lado, as classificações geradas a partir da faixa espectral de 680 a 890 nm são mais eficientes para identificar regiões com maiores concentrações de clorofila-*a* (Figura 4 (b) e (d)). A presença de maiores quantidades de fitoplâncton provoca grande variação das feições espectrais na faixa entre 680 e 800 nm, sendo este intervalo mais adequado para a realização do mapeamento da concentração de clorofila na água.

Como observado na Figura 4, as classificações que utilizaram intervalos de 400 a 890 nm e 680 a 800nm apresentaram resultados similares. Esta similaridade também pode ser encontrada nos valores numéricos dos pixels classificados das imagens A1 e A2 (Tabela 2). Os valores de exatidão total encontrados foram de 82,4% e 72,8% para as imagens A1 e A2, respectivamente. Isto indica que mesmo com um menor número de bandas é possível obter

resultados satisfatórios no mapeamento da concentração de clorofila-*a*, desde que as bandas dos sensores estejam localizadas no intervalo espectral de 680 a 800 nm.

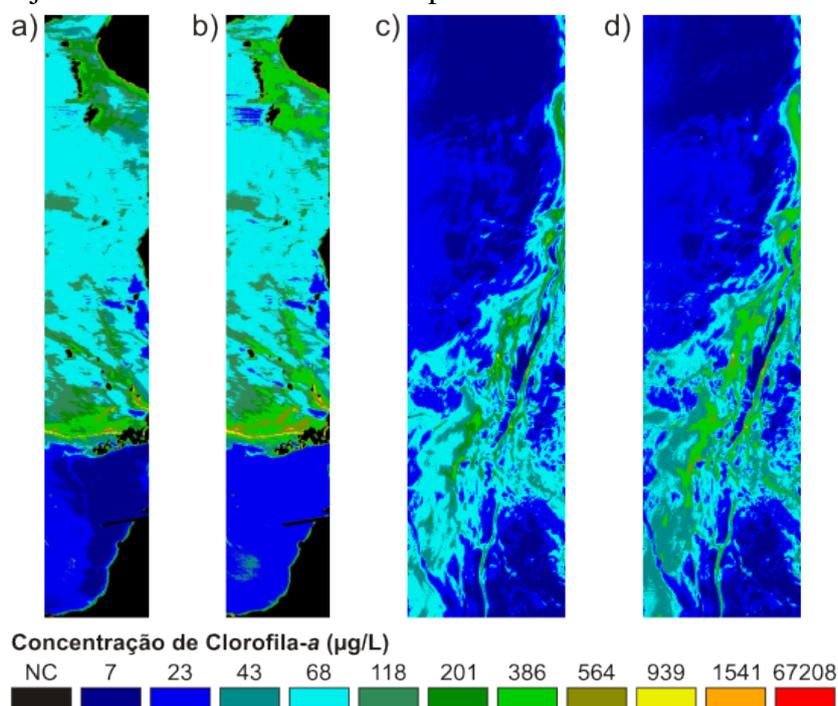


Figura 4. Classificações SAM para as imagens A1 e A2. As figuras (a) e (c) correspondem ao intervalo espectral de 400 a 890 nm, e (b) e (d) ao intervalo de 680 a 800 nm.

Tabela 2. Estatísticas das classificações de A1 e A2 em função das concentrações de clorofila.

Concentração (µg/L)	Imagem A1				Imagem A2			
	400 a 890nm		680 a 800nm		400 a 890nm		680 a 800nm	
	Nº Pixels	% Pixels						
7.21	63423	12.45	59652	11.71	120592	30.79	98245	25.08
22.83	69435	13.63	74769	14.67	135491	34.59	147026	37.54
43.04	35943	7.05	26170	5.14	27102	6.92	51822	13.23
67.81	228528	44.85	215175	42.23	95370	24.35	70385	17.97
117.63	50286	9.87	48697	9.56	645	0.16	2	0.00
201.06	30960	6.08	11181	2.19	8347	2.13	22	0.01
385.65	22923	4.50	58898	11.56	3749	0.96	22643	5.78
564.13	4742	0.93	10578	2.08	318	0.08	1445	0.37
938.97	2169	0.43	3230	0.63	61	0.02	83	0.02
1540.92	597	0.12	1055	0.21	3	0.00	7	0.00
67208.49	365	0.07	173	0.03	0	0.00	0	0.00
Não Classificado	207	0.04	0	0.00	2	0.00	0	0.00
TOTAL	509578	100.00	509578	100.00	391680	100.00	391680	100.00

Cabe destacar a influência da localização geográfica na distribuição das concentrações para cada cena. A Área 1 está localizada próxima a barragem, local onde a dinâmica da água é menor e possibilita o acúmulo de substâncias que favoreçam a floração de algas. Assim, esta região é mais favorável à presença de massas d'água com altas concentrações de clorofila. Por outro lado, a Área 2 localiza-se em uma região mais vulnerável à movimentação da água, apresentando menores concentrações de clorofila. A Figura 5 facilita esta análise, mostrando que a imagem A1 possui cerca de 20% de altas concentrações (maiores que 68 µg/L), enquanto a imagem A2 apresenta somente cerca de 5%.

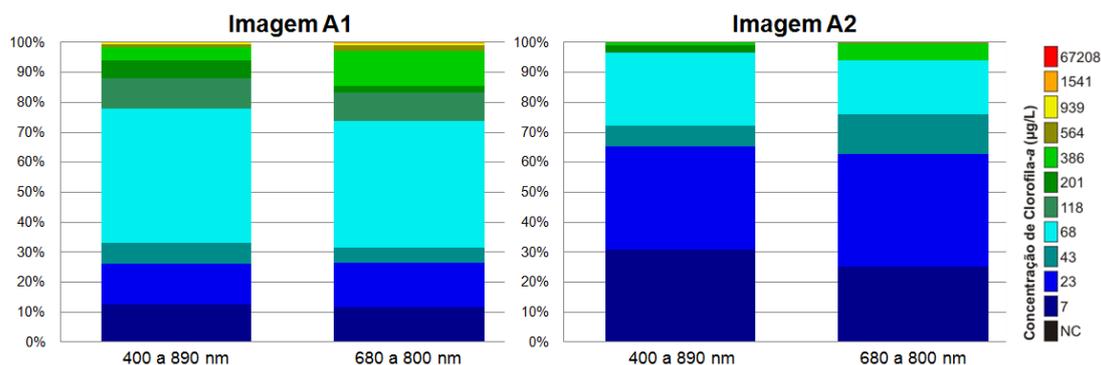


Figura 5. Distribuição percentual das classes em função da concentração de clorofila-*a*.

A similaridade entre os espectros médios da imagem SpecTIR e os espectros de referência de Londe (2008) pode ser observada pela Figura 6. Devido à diferença de intensidade entre os espectros, as curvas foram plotadas em escalas distintas, através de gráficos de dois eixos. Mesmo com grande diferença de intensidade do sinal, observa-se que a forma dos espectros da imagem e de campo é muito semelhante, ilustrando a robustez do classificador SAM para o estudo de ambientes aquáticos, já que as diferenças de iluminação entre a aquisição da imagem e a medição dos dados espectrais de campo são minimizadas.

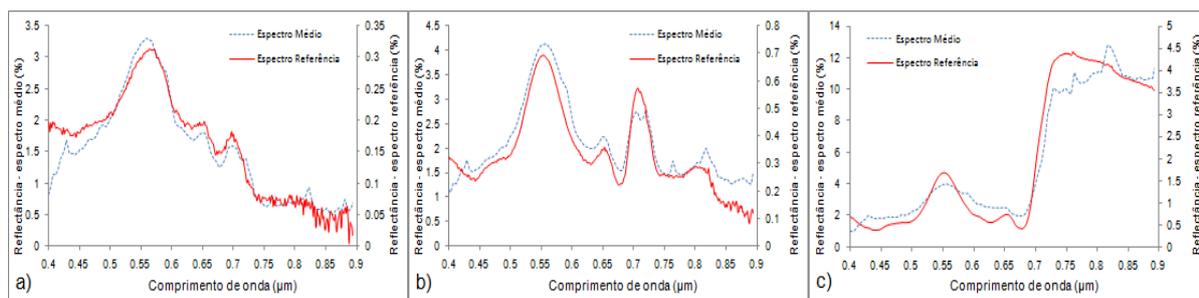


Figura 6. Comparação entre os espectros médios e de referência para três diferentes concentrações: (a) 22,83µg/L; (b) 117,63µg/L; e (c) 1540,92µg/L.

4. Conclusões

Os resultados obtidos nesta avaliação mostram que o sensor SpecTIR apresenta grande capacidade de discriminação de massas d'água com diferentes concentrações de clorofila-*a*. Sua resolução espectral de 5nm e a taxa de quantização de 12 bits são características bastante adequadas a estudos de qualidade da água. Entretanto, para uma avaliação mais precisa da quantificação de clorofila, é essencial a realização de medidas *in situ* (radiométricas e de qualidade de água) simultâneas ao sobrevôo do sensor, permitindo a validação dos dados.

Classificadores baseados em atributos espectrais apresentam melhor desempenho quando utilizam as regiões do espectro eletromagnético onde as feições espectrais do alvo estão localizadas. Assim, para apresentar resultados coerentes, é desejado que os mapeamentos de concentração de clorofila-*a* em reservatórios utilizem sensores que possuam o maior número possível de bandas na faixa espectral entre 680 e 800 nm. Esta região caracteriza-se pela grande sensibilidade ao aumento da concentração de clorofila-*a* em sistemas aquáticos continentais eutrofizados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio, a Foto Terra, por fornecer a imagem SpecTIR, a FAPESP (Processo 04/15901-4) pelo financiamento da pesquisa de doutorado de Luciana Londe. Agradecemos à Luciana Londe que cedeu seus dados espectrais e limnológicos para a realização desse experimento.

Referências Bibliográficas

Arst, H. **Optical properties and remote sensing of multicomponental water bodies**. Chichester: Praxis Publishing, 2003. 235 p.

Brando, V. E.; Dekker, A. G. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1378-1387, 2003.

Giardino, C.; Brando, V. E.; Dekker, A. G.; Strombeck, N.; Candiani, G. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 2/3, p. 183-195, 2007.

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**, v. 13, n. 17, p. 3367-3373, 1992.

Gitelson, A. A.; Dall'Olmo, G.; Moses, W.; Rundquist, D. C.; Barrow, T.; Fischer, T. R.; Gurlin, D.; Holz, J. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 3582-3593, 2008.

Hirano, A.; Marguerite, M.; Welch, R. Hyperspectral image data for mapping wetland vegetation. **Wetlands**, v.23, n. 2, p. 436-448, 2003.

Hunter, P. D.; Tyler, A. N.; Carvalho, L.; Codd, G. A.; Maberly, S. C. Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, p. 2705-2718, 2010.

Kallio, K.; Kuster, T.; Hannonen, T.; Koponen, S.; Paullainen, J.; Vespalainen, J.; Pyhalahti, T. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. **The Science of the Total Environment**, v. 268, p. 59-77, 2001.

Kuster, T.; Metsamaa, L.; Strombeck, K.; Vahtmae, E. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 67, p. 303-312, 2006.

Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. B.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P. J.; Goetz, A. F. H. The spectral image processing system (SIPS)-Interactive visualization and analysis of spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2/3, p. 145-163, 1993.

Londe, L. R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 223p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

Naumann, J. C.; Young, D. R.; Anderson, J. E. Spatial variations in salinity stress across a coastal landscape using vegetation indices derived from hyperspectral imagery. **Plant Ecology**, v.202, p. 285-297, 2009.

Pontius, J.; Martin, M.; Plourde, L.; Hallet, R. Ash decline assessment in emerald ash borer-infested regions: A test of tree-level, hyperspectral technologies. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 2665-2676, 2008.

Rudorff, C. M. **Estudo da composição das águas da Planície Amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2006. 140p. (INPE-14166-TDI/1083). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

Rudorff, C. M.; Novo, E. M. L. M.; Galvão, L. S. Reflectance of floodplain waterbodies using EO-1 Hyperion data from high and receding flood periods of the Amazon River. **International Journal of Remote Sensing**, v.30, n. 9/10, p. 2713-2720, 2009.

Rundquist, D. C.; Han, L.; Schalles, J. F.; Peake, J. S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 2, p. 195-200, 1996.

Spectir. Disponível em:<<http://www.spectir.com/>>. Acesso em: 21 out. 2010.