

# ANÁLISE DE CURVAS DE REFLECTÂNCIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE PLANTAS AQUÁTICAS SUBMERSAS EM ÁGUAS DE BAIXA TURBIDEZ

FERNANDA SAYURI YOSHINO WATANABE<sup>1</sup>

NILTON NOBUHIRO IMAI<sup>2</sup>

LUIZ HENRIQUE DA SILVA ROTTA<sup>1</sup>

ALEX GARCEZ UTSUMI<sup>1</sup>

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

<sup>2</sup>Departamento de Cartografia, Presidente Prudente – SP

fernandasyw@gmail.com, nnimai@fct.unesp.br, {luizhrotta, alex\_utsumi}@yahoo.com.br

**RESUMO** – A vegetação aquática submersa é um componente importante na manutenção do equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. No entanto, em ambientes aquáticos modificados, como os reservatórios, observa-se o desenvolvimento descontrolado dessas plantas, causando diversos problemas, como ao setor energético e à navegação. Entretanto, o mapeamento de plantas aquáticas submersas é dificultado por diversos fatores, dentre eles a altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação, a cobertura vegetal, a geometria de iluminação e as propriedades ópticas inerentes. Além disso, os sistemas sensores multiespectrais atuais não possuem bandas específicas destinadas à detecção da vegetação aquática submersa e alguns algoritmos comumente empregados no tratamento de dados espectrais se mostram ineficientes. Nesse sentido, este artigo visa apresentar os resultados obtidos com a classificação dos dados hiperspectrais, apontando os procedimentos de análise dos dados e as bandas mais adequadas na identificação de macrófitas submersas. Os resultados mostram que os comprimentos de onda do amarelo e vermelho, assim como algoritmos e dados que consideram a forma da curva espectral são mais eficazes na detecção das plantas aquáticas submersas.

**Palavras chave:** Vegetação aquática submersa, Sensoriamento remoto, Sensores ópticos, Análise de agrupamento, Remoção do contínuo.

**ABSTRACT** - Submerged aquatic vegetation is an important component in maintaining the balance of aquatic ecosystems. However, modified aquatic environments as reservoirs, there is uncontrolled development for these plants, causing problems to the energy sector and shipping. However, the mapping of submerged aquatic plants is hampered by several factors, including the height of water column on the vegetation canopy, vegetal cover, the illumination geometry and the inherent optical properties. Furthermore, current multispectral sensors systems do not have specific bands for the detection of submerged aquatic plants and some algorithms commonly employed in the treatment of spectral data are inefficient. Thus, this paper presents the results obtained for classification of hyperspectral data, pointing out the procedures for data analysis and the bands most suitable for the identification of submerged macrophytes. The results show that the wavelengths of yellow and red, as well as algorithms and data that consider the spectral shape of the curve are more effective in detecting submerged aquatic plants.

**Key words:** Submerged aquatic vegetation, Remote sensing, Optical sensor, Cluster analysis, Continuum removal.

## 1 INTRODUÇÃO

A vegetação aquática submersa tem um papel importante na manutenção do equilíbrio de ecossistemas aquáticos (ESTEVES, 1998; WETZEL, 2001). Apesar da importância dessas plantas na dinâmica desses

ecossistemas, elas podem formar densas e extensas colonizações em corpos d'água, onde o equilíbrio ecológico foi rompido (PITELLI et al., 2008). O desenvolvimento desequilibrado de plantas daninhas aquáticas promove decréscimo da biodiversidade aquática, ameaça *habitats*, altera ciclos de nutrientes e

degrada a qualidade das águas continentais, de estuários e de planícies de inundação (HESTIR et al., 2008).

A detecção do sinal das macrófitas submersas depende da profundidade da coluna d'água, do tipo de fundo, da espécie e abundância da macrófita, e da qualidade da água (PEÑUELAS et al., 1993). Outros fatores que podem interferir são as condições climáticas, iluminação do sol, ângulo de visada, propriedades ópticas aparentes da água (reflectância de superfície e a atenuação difusa vertical), e de propriedades ópticas inerentes que não dependem da distribuição da radiação ambiente na coluna d'água (HESTIR et al., 2008).

Vários trabalhos apresentaram dificuldade no mapeamento da vegetação aquática submersa utilizando imagens de sensoriamento remoto (ACKLESON e KLEMAS, 1987; HAN e RUNDQUIST, 2003; ANDREW e USTIN, 2008; HESTIR et al., 2008). Observa-se que muitos trabalhos empregam bandas espectrais específicas para o mapeamento da vegetação terrestre, como o infravermelho, mas que são altamente atenuadas pela água. Neste sentido, a hipótese deste trabalho é que haja intervalos de comprimentos de onda específicos que permitam identificar o sinal da vegetação aquática submersa. Por esta razão, o objetivo deste trabalho é determinar essas bandas espectrais para as condições de baixa turbidez que caracteriza este estudo de caso. E espera-se que os resultados obtidos possam dar subsídio ao desenvolvimento de sensores que apresentem bandas espectrais específicas para o mapeamento da vegetação aquática submersa e apontar procedimentos de análise adequados.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são apresentados os equipamentos e aplicativos utilizados neste trabalho, bem como os procedimentos metodológicos de aquisição e tratamento dos dados.

### 2.1 Materiais

Foram utilizados neste trabalho os seguintes equipamentos e softwares:

- ✓ Espectrorradiômetro *FieldSpec® HandHeld UV/VNIR*, *ASD<sub>Inc</sub> (Analytical Spectral Devices)*;
- ✓ Aplicativo *RS<sup>3TM</sup>* para aquisição de dados espectrorradiométricos;
- ✓ Cabo de fibra óptica;
- ✓ Lentes: *RCR (Remote Cosine Receptor)*, projetada para aquisição de dados de irradiância, e *UW FOV 20°* para coleta de radiação;
- ✓ Aplicativo *ViewSpecPro<sup>TM</sup>*, da empresa *ASD<sub>Inc</sub>*;
- ✓ Ecobatímetro digital e científico, modelo *DT-X*, da *BioSonics*;
- ✓ Aplicativo *Visual Aquisition*, da *BioSonics*;
- ✓ GPS *SPS361*, da *Trimble*, com correção *OmniSTAR VBS*;
- ✓ Turbidímetro digital portátil/bancada, modelo *AP2000*, da *Polincontrol*.
- ✓ Aplicativo *Excel*, do pacote *Microsoft Office*;

- ✓ Aplicativo estatístico *Minitab*.

### 2.1 Estudo de caso

No presente trabalho realizou-se um estudo de caso a fim de analisar o comportamento espectral do dossel de vegetação aquática submersa (VAS) com diferentes alturas de coluna de água e alvos sem a presença dessa vegetação tanto em locais opticamente rasos como em águas cuja resposta espectral não recebam contribuição do fundo.

### Levantamento de dados em campo

O levantamento de dados de campo foi realizado no córrego Ferreira, localizado no reservatório da usina hidrelétrica de Nova Avanhandava, no Rio Tietê, Estado de São Paulo. A Figura 1 mostra a área e as estações de coleta dos dados.

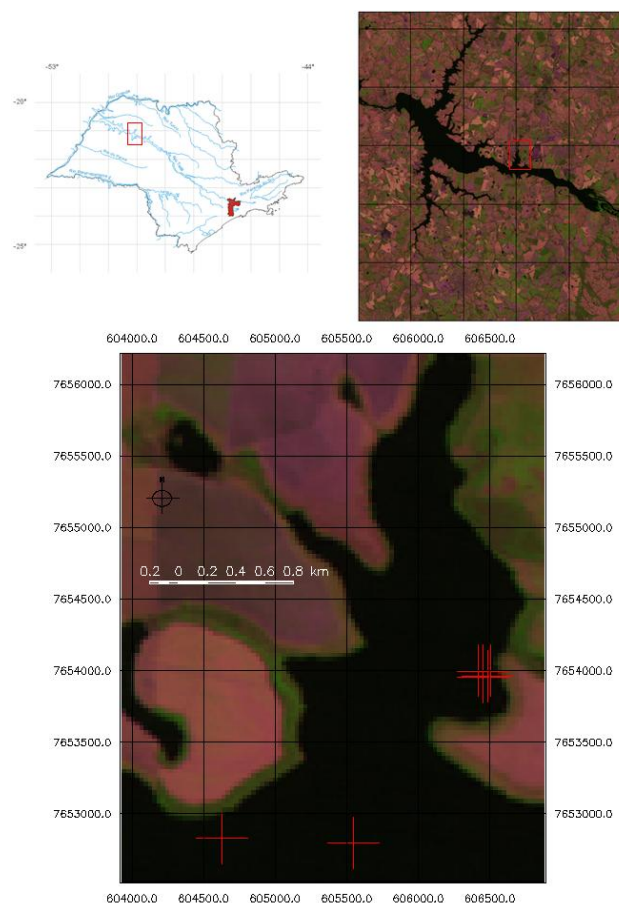


Figura 1 – Córrego Ferreira, reservatório de Nova Avanhandava, Rio Tietê, Estado de São Paulo.

O levantamento dos dados foi realizado entre os dias 27 a 29 de setembro de 2011. No primeiro dia foi feito um levantamento batimétrico no córrego a fim de selecionar uma pequena área de coleta dos dados. Assim, foi escolhida uma área com alta infestação por macrófitas submersas e condições regulares de baixa turbidez. A espécie submersa predominante era a *Ceratophyllum*

*demersum* encoberta por uma grande quantidade de perífiton, como mostra a Figura 2.



Figura 2 – Infestação por *Ceratophyllum demersum* e perífiton, em setembro de 2011

Foram coletados dados de reflectância, radiância ascendente e irradiância ascendente e descendente. A Tabela 1 apresenta o nome das estações e identifica as amostras e os dados coletados em cada uma delas.

Tabela 1 – Descrição da amostragem

ID	Estação	Amostras	R*	E, L*	H <sub>CD</sub> (m)	Turb.
-	M01	M01		X	1	2,96
-	M02	M02		X	0,2	1,44
-	M03	M03		X	0,2	1,42
-	M04	M04		X	0,6	-
-	M05	M05		X	0,6	-
1	M06	M06	X		S/P**	1,98
2	M07	M07	X		0,15	1,31
3	M07	M08	X		0,01	1,31
4	M07	M09	X		0,2	1,31
5	M07	M10	X		2	1,31
6	M07	M11	X		0,46	1,31
7	M07	M12	X		0,07	1,31
8	M13	M13	X		S/P**	2,16
9	M13	M14	X		S/P**	2,16
10	M13	M15	X		3	2,16
11	M05	M16	X		0,63	1,67
12	M05	M17	X		1	1,67
13	M05	M18	X		0,22	1,67
14	M19	M19	X		0,15	1,41
15	M19	M20	X		0,3	1,41
16	M19	M21	X		0,5	1,41
17	M19	M22	X		0,05	1,41
18	M23	M23	X		2	1,45
-	M23	M24		X	2	1,45
-	M25	M25		X	S/P**	1,2
19	M25	M26	X		S/P**	1,2
20	M27	M27	X		S/P**	1,2

A Tabela 1 mostra também a altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação (das amostras com plantas) e a turbidez de cada estação.

A amostragem dos dados baseou-se no esquema de estações de coleta, onde foram coletadas diversas amostras. Dessa forma, em cada posição foi coletada uma amostra da resposta espectral, num total de 20 amostras de reflectância e 7 de radiância e irradiância.

## 2.2 Procedimentos metodológicos

Os dados de radiância, irradiância e reflectância foram pré-processados no aplicativo *ViewSpecPro™*. Os espectros de radiância e irradiância obtidos foram utilizados na estimação de algumas propriedades ópticas aparentes: reflectância de sensoriamento remoto e a reflectância de irradiância de subsuperfície. Ambas as propriedades foram comparadas, em termos de qualidade do sinal e da representatividade do comportamento espectral das plantas aquáticas submersas.

Primeiramente, foi realizada uma suavização das curvas de reflectância que apresentavam interferência por ruído aleatório. Foi utilizada a técnica de filtragem por média móvel (TSAI e PHILPOT, 1998).

Para discriminação da resposta espectral de águas com e sem plantas aquáticas submersas, neste trabalho foi adotada a abordagem de classificação não supervisionada baseada em análise de agrupamento. Os métodos de análise de agrupamento tendem a organizar um conjunto de indivíduos, que apresentam certas características em comum, em grupos homogêneos. Os agrupamentos podem indicar meios informais de verificar a dimensionalidade, identificar *outliers* e sugerir hipóteses referentes a determinadas relações entre variáveis (JOHNSON e WICHERN, 2007). Para geração dos agrupamentos podem ser adotados algoritmos que calculam a similaridade ou dissimilaridade a partir do cálculo de distâncias que indica a proximidade entre os agrupamentos formados (KRZANOWSKI e MARRIOTT, 1995).

Para considerar a forma das curvas de reflectância na classificação por análise de agrupamento foram adotados como dados de entrada os parâmetros de banda obtidos com a remoção do contínuo. A remoção do contínuo é uma técnica utilizada para isolar e analisar feições de absorção específicas (KRUSE et al., 1993a), utilizada em estudos geológicos (CLARK e ROUSH, 1984; KRUSE et al., 1993a).

Foram testados diferentes intervalos de comprimento de onda do visível, em uma região de menor reflectância, entre o verde e o *red edge* (vermelho limítrofe). A escolha de uma região do visível foi baseada na maior capacidade de penetração na coluna d'água desses comprimentos de onda em relação à radiação do infravermelho próximo, altamente atenuada pela água.

Assim, na análise de agrupamento foram utilizados 6 parâmetros de banda obtidos com o contínuo removido: altura, posição, meia altura, largura, assimetria e área. Neste trabalho foram adotados: a ligação média como

método hierárquico de agrupamento, o quadrado da distância Euclidiana como medida de distância e uma similaridade de 95.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de reflectância de sensoriamento remoto e de reflectância de irradiância de subsuperfície são apresentadas na Figura 3.

Ao analisar as curvas de ambos os gráficos (Figura 3), nota-se uma alta variação da intensidade das propriedades ópticas aparentes de uma amostra para outra, dificultando até mesmo a análise das curvas em um único gráfico. Essa variabilidade pode estar associada à sensibilidade dessas medidas em relação às mudanças de iluminação no momento da tomada dos dados (MOBLEY, 1994).

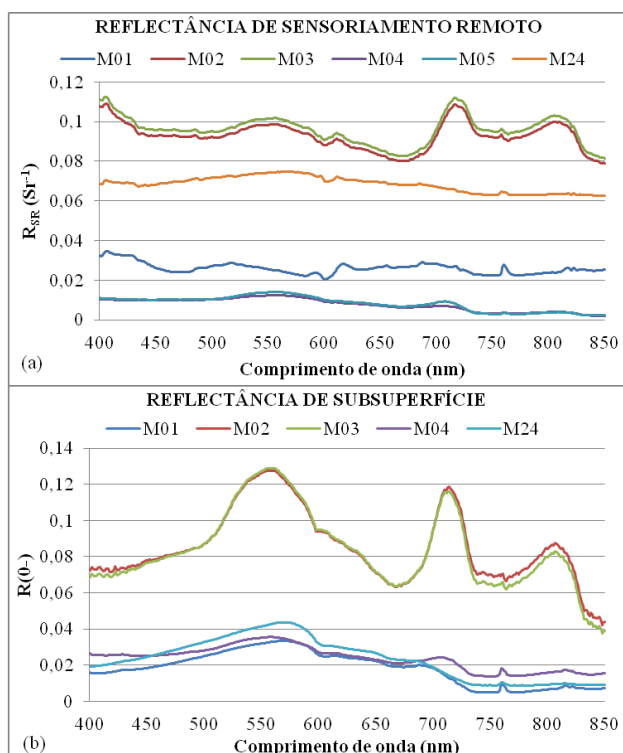


Figura 3 – Espectros de (a) reflectância de sensoriamento remoto e (b) reflectância de irradiância de subsuperfície

Além da iluminação, esta variação pode estar associada com a diferença de altura de coluna d'água sobre do dossel da vegetação entre as curvas. Nota-se na Figura 3a que as curvas M04 e M05 apresentam reflectância de sensoriamento remoto bem menor do que dos espectros M01 e M02, em que há uma diferença de 40 cm de coluna d'água. O baixo valor do sinal em locais mais profundos é uma característica importante a ser considerado no desenvolvimento de sensores que visem o registro do sinal da vegetação aquática submersa, uma vez que a razão sinal ruído pode ser um fator limitante, impedindo que seja possível detectar o sinal oriundo das plantas. Além disso, no processo de tratamento desses dados, esse efeito deve ser compensado.

Comparando os espectros de reflectância de sensoriamento remoto com os de reflectância de irradiância de subsuperfície, nota-se que o primeiro, aparentemente, parece caracterizar melhor as feições espectrais da vegetação aquática submersa, realçando mais picos de reflectância associadas às plantas aquáticas submersas. No entanto, o segundo gera curvas menos ruidosas e parece representar melhor as feições de absorção e espalhamento das águas.

A Figura 4 apresenta o resultado da análise de agrupamento utilizando como dados de entrada da classificação os parâmetros de banda obtidos com a remoção do contínuo espectral para o intervalo de 585 – 685 nm.

O número que representa as observações no dendograma são os mesmos valores dos IDs apresentados na Tabela 1, indicando cada uma das amostras de reflectância coletadas. Na Tabela 2 são apresentadas as classes geradas e os espectros que os compõem obtidos por análise de agrupamento.

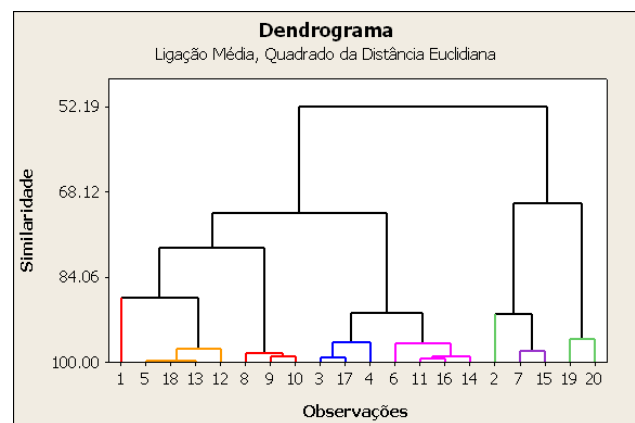


Figura 4 – Resultado obtido com a classificação por análise de agrupamento

Analisando a Tabela 2, destaca-se que apenas o agrupamento 3 apresenta confusão, classificando em uma mesma classe uma curva com vegetação aquática submersa com espectros sem macrófitas submersas.

Tabela 2 – Classes geradas na análise de agrupamento

Classes	Curvas
1	M06
2	M10, M17, M18, M23
3	M13, M14, M15
4	M08, M09, M22
5	M11, M16, M19, M21
6	M07
7	M12
8	M26, M27

A elevada altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação, de cerca de 3 metros, atenuou bem o sinal da vegetação, de modo que o algoritmo de agrupamento adotado não foi capaz de detectar a resposta da planta. Apesar de não ter sido possível separar as curvas de acordo com a altura de coluna d'água sobre o dossel, as

demais classes geradas apresentam consistência na classificação, tendo sido distinguido espectros com e sem plantas.

A Figura 5 apresenta as curvas de reflectância separadas segundo o resultado da classificação por análise de agrupamento. As curvas dos agrupamentos 2, 3, 5 e 6 apresentam dois picos no infravermelho, em torno de 720 nm e 810 nm, característicos de presença de macrófitas submersas.

O agrupamento 4 também possui apenas espectros de reflectância com plantas aquáticas submersas. No entanto, essas curvas se assemelham mais a de espectros

que não apresentam plantas aquáticas submersas. Com exceção de M18 (0,22 m), as demais curvas apresentam altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação de 1 – 2 m. Essa altura atenua bem a radiação, principalmente no infravermelho, fazendo com que as feições associadas ao sinal da vegetação aquática submersa nessa região praticamente desapareçam. Apesar disso, a classificação utilizando os parâmetros de banda do contínuo removido adotando a banda de absorção do visível (585 – 685 nm) foi capaz de distinguir a resposta espectral das curvas com e sem macrófitas submersas.

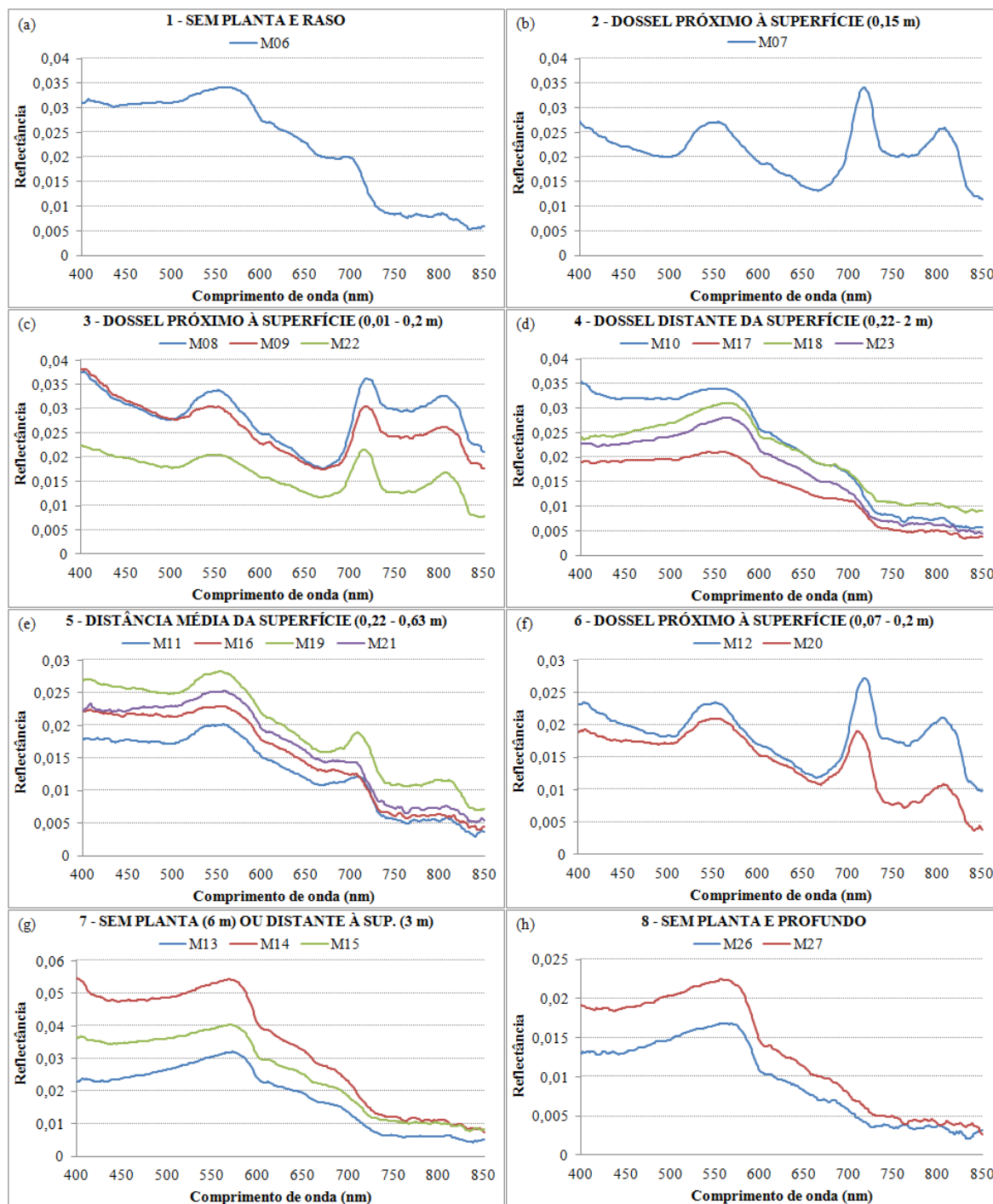


Figura 5 – Curvas de reflectância agrupadas segundo classificação por análise de agrupamento

Essa região do espectro visível também foi adequada para discriminar as curvas sem plantas aquáticas submersas de acordo com a profundidade da coluna d'água. Verifica-se que os agrupamentos 1 e 2 são compostos por curvas coletadas em posições sem plantas aquáticas submersas, se diferenciando pela profundidade da coluna d'água (1 m para o primeiro e de 15 – 20 m para o segundo).

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o objetivo do trabalho foi alcançado, sendo indicado o intervalo de banda mais adequada na identificação das macrófitas submersas, bem como as técnicas de tratamento de dados.

O intervalo de 585 a 685 nm que corresponde à região do final do verde, amarelo e vermelho, apresentou resultados satisfatórios na identificação de plantas aquáticas submersas. A utilização dos parâmetros de banda obtidos com a remoção do contínuo dessa região do espectro como entrada da classificação por análise de agrupamento permitiu distinguir de forma satisfatória as curvas com e sem macrófitas submersas. Além disso, essa abordagem foi capaz de separar os espectros de locais sem vegetação aquática submersa segundo a profundidade da coluna d'água.

As propriedades ópticas aparentes, estimadas com a partir das medidas de radiância e irradiância, mostram o baixo valor do sinal da vegetação aquática submersa. Sendo assim, a razão sinal ruído é um fator importante a ser considerado no desenvolvimento de sensores e bandas que tenham por objetivo a aquisição de dados de alvos subaquáticos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PPGCC (Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas) e a FEPAF (Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais) pelo auxílio financeiro na realização de levantamentos de campo. Agradecimentos também ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida.

#### REFERÊNCIAS

ACKLESON, S. G.; KLEMAS, V. Remote sensing of submerged aquatic vegetation in lower Chesapeake Bay: a comparison of Landsat MSS to TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York: Elsevier Science Publishing, v. 22, p. 235 – 248, 1987.

ANDREW, M. E.; USTIN, S. L. The role of environmental context in mapping invasive plants with hyperspectral image data. **Remote Sensing of Environment**. Elsevier. 2008. v. 112. p. 4301 – 4317.

CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing

applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. B7, p. 6329 – 6340, 1984.

ESTEVEZ, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

HAN, L.; RUNDQUIST, D. C. The spectral responses of *Ceratophyllum demersum* at varying depths in an experimental tank. **International Journal of Remote Sensing**. Francis & Taylor, n. 24. p. 859 – 864, 2003.

HESTIR, E. L.; KHANNA, S.; ANDREW, M. E.; SANTOS, M. J. VIERS, J. H.; GREENBERG, J. A.; RAJAPAKSE, S. S.; USTIN, S. L. Identification of invasive vegetation using hyperspectral remote sensing in the California Delta ecosystem. **Remote Sensing of Environment**. Elsevier, v. 112. p. 4034 – 4047, 2008.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. 6<sup>th</sup> Edition. Delhi: Pearson Education, 2007.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; DIETZ, J. B. Expert system-based mineral mapping in northern death valley, California/Nevada, using the Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, v.44, n. 2-3, p. 309 – 336, 1993a.

KRZANOWSKI, W. J.; MARRIOTT, F. H. C. **Multivariate analysis – Parte 2: classification, covariance structure and repeated measurements**. London: Arnold, 1995.

MOBLEY, C. D. **Light and water: radiative transfer in natural waters**. San Diego: Academic Press, 1994.

PEÑUELAS, J.; GAMON, J. A.; GRIFFIN, K. L.; FIELD, C. B. Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**. New York: Elsevier Science, v. 46, p. 110 – 118, 1993.

PITELLI, R. L. C. M.; TOFFANELI, C. M.; VIEIRA, E. A.; PITELLI, R. A.; VELINI, E. D. Dinâmica da comunidade de macrófitas aquáticas no reservatório de Santana, RJ. **Planta Daninha**, v. 26, n. 3, p. 473 – 480, 2008.

TSAI, F.; PHILPOT, W. Derivative Analyses of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**. New York: Elsevier, v. 66, p. 41–51, 1998.

WETZEL, R. G. **Limnology: lake and river ecosystems**. 3<sup>rd</sup> Ed. London: Elsevier Academic Press, 2001.