

CAPÍTULO 13

RESPOSTA ESPECTRAL DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS

Cristina Aparicio¹ & Marisa Dantas Bitencourt²

1 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Inconfidentes, Brasil. 2- Departamento de Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, Brasil.
E-mail: ¹cristina.aparicio@ifsuldeminas.edu.br e ²tencourt@usp.br

RESUMO

A discriminação de espécies de macrófitas através de Sensoriamento Remoto vem de encontro a necessidades econômicas e sanitárias geradas pelo aumento dos conglomerados urbanos e seus danos aos ambientes aquáticos continentais. A escassez de pesquisa básica relacionada à obtenção de respostas espectrais específicas tem dificultado a discriminação das espécies de macrófitas, em imagens multiespectrais. Tendo o conhecimento da necessidade de pesquisa nesse sentido, neste capítulo serão exploradas algumas possibilidades de análise da resposta espectral de espécies de macrófitas, sendo elas o uso de satélites para a localização de macrófitas emersas e submersas, a comparação de espécies em relação à sua resposta espectral em diferentes faixas de comprimento de onda e as características anatômicas que se relacionam com a resposta espectral na faixa espectral do Infravermelho Próximo.

1 INTRODUÇÃO

Macrófitas ou hidrófitas são vegetais que vivem em sistemas aquáticos continentais, com folhas imersas, flutuantes ou emersas. As macrófitas, por viverem em sistemas aquáticos susceptíveis à interferência humana e se utilizarem de nutrientes dispersos na água para aumentar sua biomassa, podem se reproduzir a ponto de interferirem de forma positiva ou negativa em alguns sistemas aquáticos. Um exemplo de interferência positiva é o uso de macrófitas para o tratamento de esgoto, pois elas retiram os nutrientes que estão em excesso (KADLEC; WALLACE, 2009; VYMAZAL, 2008; BRIX; SCHIERUP, 1987). A interferência negativa se dá quando a reprodução intensa de macrófitas ocorre, por exemplo, em reservatórios construídos para fins hidroelétricos, nos quais um dos problemas comuns é a eutrofização. Quando os nutrientes atingem altas concentrações, as macrófitas, sejam emersas ou submersas, infestam o corpo d'água e podem alterar a qualidade da água, dificultar a navegação, e causar prejuízos ao funcionamento adequado dos geradores. Além disso, o aumento na densidade de macrófitas pode ocasionar sérios problemas de saúde pública, pois algumas espécies dessas plantas podem servir de habitat para insetos que são, com frequência, vetores de enfermidades de transmissão indireta, como é o caso da malária, dengue e febre amarela.

Os sistemas aquáticos continentais são ecologicamente complexos, especialmente em regiões tropicais com alta biodiversidade, e diversos estudos têm sido realizados nesses ambientes, dirigidos ao monitoramento de parâmetros tanto bióticos como abióticos (HENRY, 1999; ESTEVES, 1998). Entretanto, estes estudos demandam muito tempo e têm custo elevado, especialmente no Brasil, um país onde esses sistemas podem abarcar grande extensão territorial (CARVALHO et al., 2003; MARTINS et al., 2003). A utilização de Sensoriamento Remoto (SR) em estudos de sistemas aquáticos tem sido ampliada desde o final do século passado e demanda, com seu uso, novos estudos relacionados à acurácia dos dados obtidos e ao desenvolvimento de novas técnicas de análise.

Ao longo das últimas décadas, muitos pesquisadores têm dirigido seus esforços para aperfeiçoar metodologias que possam gerar resultados baseados no uso de SR para estudar sistemas aquáticos continentais, despendendo menos tempo e recursos financeiros (THOMAZ; BINI, 2003; JAKUBAUSKAS et al., 2000; RITCHIE; COOPER, 2001; WELCH; REMILLARD, 1988). Em ambientes computacionais para análises espaciais, como são os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), os dados obtidos através do uso de SR podem ser utilizados, juntamente com outros dados quali e quantitativos, para inferir diversas informações sobre alvos na superfície terrestre, muitas vezes com a utilização de ferramentas geoestatísticas que podem ainda gerar novas informações.

Desde as primeiras décadas do século passado muito se tem feito no sentido de aprofundar os conhecimentos sobre a composição química e as estruturas internas de objetos remotamente sensoriados, no intuito de entender a interação destes com a Radiação Eletromagnética (REM). Uma especial atenção tem sido dada à vegetação por conta de sua importância para a vida na Terra e, assim, nas últimas décadas tem havido muitas pesquisas envolvendo as respostas espectrais da vegetação. As recentes pesquisas nessa área de estudos têm buscado diferenciar as espécies vegetais apenas através de sua resposta espectral, de modo a permitir seu reconhecimento em imagens produzidas por sensores orbitais (satélites) com maior precisão.

Com tudo isso em vista o SR tem, portanto, sido cada vez mais utilizado nos dias de hoje, em função principalmente de possibilitar análises em áreas extensas, que possibilitam o estudo de corpos d'água de tamanhos variados, e tem trazido bons indicadores ao monitoramento e ao controle ecológico desses corpos d'água. A importância de utilizá-lo no monitoramento de macrófitas reside principalmente em auxiliar no monitoramento temporal dos bancos de macrófitas e na necessidade de diminuir os custos para o monitoramento e controle dos mesmos em áreas de grande extensão territorial (CARVALHO et al., 2003; MARTINS et al., 2003).

Para a análise dos resultados obtidos com SR têm sido utilizadas diferentes técnicas de análise de imagens, incluindo o uso de índices e métodos de classificação obtidos tanto de fotografias aéreas como de imageadores aéreo e orbital, multi ou hiperespectrais. Os avanços tecnológicos das

últimas décadas melhoraram as resoluções espaciais, espectrais e temporais de sensores remotos, possibilitando diversos estudos de mapeamento e monitoramento de espécies de macrófitas (ABDON; MEYER, 1989; BITENCOURT-PEREIRA, 1992; PALOMBO; BITENCOURT-PEREIRA, 1992; REMILLARD; WELCH, 1992; LEHMAN et al., 1994, 1997; LEHMAN; LACHAVANNE, 1997; MALTHUS; GEORGE, 1997; MALTHUS et al., 1997; ALBEROTANZA et al., 1999; EVERITT et al., 1999; DEKKER, 2001; JAKUBAUSKAS; PETERSON, 2002; WALDRON et al., 2001; GRACIANI; NOVO, 2003; LIMA et al., 2003; MATHEW et al., 2003; VASCONCELOS; NOVO, 2003).

As análises com Sensoriamento Remoto Orbital para macrófitas são similares às utilizados para a vegetação terrestre, respeitando-se as restrições devidas às características peculiares de cada espécie e as alterações que podem ocorrer na Reflectância, derivadas principalmente da mistura da resposta espectral proveniente da espécie com a resposta espectral do corpo de água sob os indivíduos, das substâncias presentes nesse corpo d'água, do fundo do corpo d'água, entre outros fatores.

Para se estudar as macrófitas, leva-se em conta o fato de que as respostas espectrais da vegetação seguem um padrão similar nas diferentes faixas do espectro eletromagnético. No Brasil, alguns estudos utilizando SR para o estudo de macrófitas foram iniciados nos anos 90 (BITENCOURT-PEREIRA, 1992; PALOMBO; BITENCOURT-PEREIRA, 1992), com o intuito de melhorar as análises das infestações em reservatórios de usinas hidrelétricas. Entretanto, esses estudos restringiam-se ao mapeamento e monitoramento das infestações (GRACIANI; NOVO, 2003; LIMA et al., 2003; VASCONCELOS; NOVO, 2003; ABDON; MEYER, 1989) e não ao estudo direto da resposta espectral de espécies. São encorajadores os resultados recentes obtidos sobre a resposta espectral de espécies de macrófitas e, neste capítulo, são apresentadas algumas dessas novas abordagens para o estudo de macrófitas utilizando SR.

2 MACRÓFITAS E SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

As macrófitas, como toda vegetação, possuem uma resposta espectral com variações esperadas ao longo do espectro de radiação eletromagnética. As características espectrais dos vegetais em geral, incluindo as macrófitas, refletem a absorção da REM pelos pigmentos na região do visível (400 a 700 nm), a reflectância da REM na região do Infravermelho Próximo (IVP - 700 - 1200 nm) em função da estrutura anatômica, e a absorção da REM pela água na região do Infravermelho Médio (1200 - 2500 nm). A resposta espectral dos vegetais é, portanto, singular, e depende tanto da qualificação e quantificação dos pigmentos presentes quanto do conhecimento da estrutura anatômica e do conteúdo de água presente nas folhas (LILLESAND; KIEFER, 2000), o que pode variar conforme a espécie, a idade de folhas e indivíduos, o habitat, o tipo de substrato, o estado fitossanitário, as características fisiológicas, entre outros. A presença dessas particularidades indica que é possível distinguir as espécies através da intensidade e das variações de sua resposta espectral ao longo do Espectro Eletromagnético (EEM).

No caso de vegetais como as macrófitas, para facilitar a compreensão da resposta espectral é conveniente dividi-las conforme sua posição no corpo d'água: 1) Macrófitas com Folhas Emersas ou ao nível da água, que incluem todas as espécies enraizadas ou não que apresentam folhas imersas e 2) Macrófitas com Folhas Submersas, que incluem todas as espécies cujas folhas permanecem imersas na água. Quando analisados por Sensoriamento Remoto, esses grupos de macrófitas apresentam interferências diferentes em função do habitat. Em ambos os casos são fatores importantes para a análise da resposta espectral obtida em ambiente natural: a resposta espectral da água e as substâncias opticamente ativas presentes, a influência do fundo do corpo d'água (especialmente no caso de locais mais rasos), a densidade, disposição, condições fisiológicas e a idade dos indivíduos e folhas, e as condições ecológicas que incluem número de indivíduos na população, dominância, entre outros. A característica diferencial das espécies submersas é que elas estão envolvidas pelo corpo d'água e, portanto, sua resposta espectral dependerá ainda da profundidade em que se encontram (MALTHUS et al., 1997). Cálculos matemáticos envolvendo

índices e derivadas têm sido comumente utilizados para filtrar interferências e localizar variáveis importantes para a melhor descrição das respostas espectrais dos alvos (LILLESAND; KIEFFER, 2000; MALTHUS; DEKKER, 1995; GOODIN, 1993).

Um dos primeiros estudos realizados no Brasil para o reconhecimento de espécies de macrófitas por Sensoriamento Remoto foi o de Palombo; Bitencourt-Pereira (1992). Eles identificaram bancos de *Pistia stratiotes* L. e *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms no reservatório Rio das Pedras, no Complexo Billings, utilizando imagens da série *Thematic Mapper LANDSAT*. Ficou evidente a distinção de ambas as espécies na faixa do IVP desse satélite, com resolução espacial de 30 metros. Nesse caso as duas macrófitas eram emersas. Restava a dúvida de se uma macrófita submersa seria reconhecida pelo sistema. Assim, baseando-se apenas nas características singulares da vegetação, em 2007 foi realizado um estudo, também no Complexo Billings, onde foi possível distinguir entre uma macrófita emersa e uma submersa e, ainda, diferenciar entre amostras de água com diferentes características (APARICIO, 2007).

Na Figura 1, a seguir, pode-se observar os braços do Rio Grande e Riacho Grande no Complexo Billings, onde foram localizadas duas espécies de macrófitas: *Pistia stratiotes* (Rio Grande) – uma espécie emersa, e *Mayaca fluviatilis* Aubl. (Riacho Grande) – uma espécie submersa, que se encontrava próxima à superfície (a cerca de 2 a 10 cm de profundidade), em um lago marginal do Rio das Pedras. As imagens utilizadas foram do satélite *IKONOS-2*, com resolução espacial de 4 metros e faixas espectrais no Visível (Azul, Verde e Vermelho) e no Infravermelho Próximo (IVP), todas essas tendo sido utilizadas durante as análises.

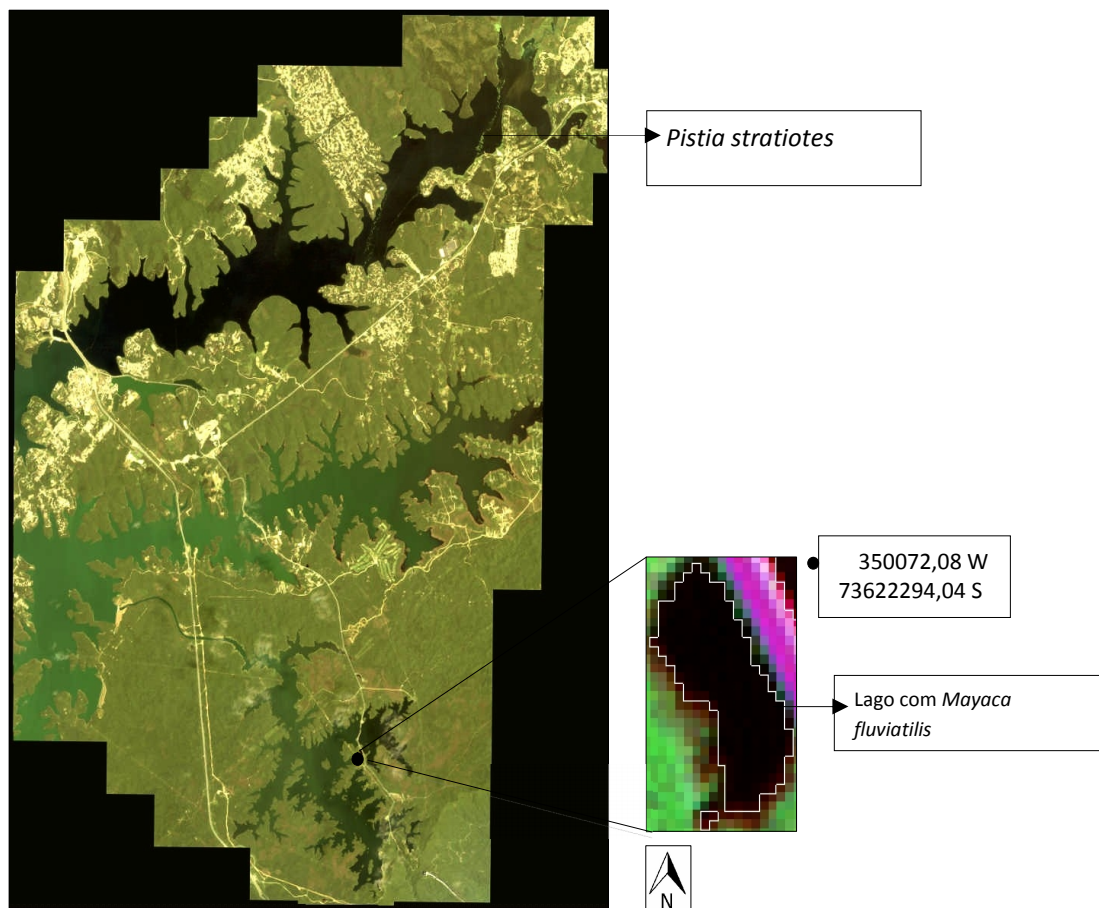


Figura 1: Composição colorida de imagem do satélite IKONOS-2 com a localização de *Pistia stratiotes* (Rio Grande) e *Mayaca fluviatilis* (Riacho Grande) no Complexo Billings – Grande São Paulo.

Levando-se em conta que uma das espécies é submersa e apresentava interferência do corpo d'água, para verificar se a distinção da macrófita foi efetiva, foi testada a diferenciação espectral de

amostras de água de diferentes locais, comumente distintos em relação à concentração de substâncias opticamente ativas. A qualidade da água nesses locais consta da Tabela 1.

Os dados espectrais foram processados e, para testar a diferenciação entre as diferentes respostas, foi feita uma análise estatística do tipo multivariada. Na Figura 2 podem ser observados os resultados de uma Análise de Correspondência (dados não padronizados), efetuada com o intuito de testar o agrupamento das variáveis (macrófita emersa, macrófita submersa, água do Riacho Grande -alta concentração de MST e água do Rio Grande - baixa concentração de MST) conforme sua resposta espectral. A distribuição das amostras foi também comparada à influência das faixas espectrais (Azul, Verde, Vermelho e IVP) do satélite IKONOS-2 de modo a indicar qual ou quais das faixas tiveram maior interferência nessa distribuição.

Tabela 1: Concentrações de material em suspensão (MST - total, MSO - orgânico ou MSI - inorgânico), clorofila-a (Chl-a) e feofitina (Feof) nos braços dos reservatórios Billings (novembro/2004) em diferentes profundidades nos braços do Rio Grande e do Riacho Grande – Complexo Billings/SP

| Braços | Prof. (m) | MST (mg/l) | MSO (%) | MSI (%) | Chl-a (ug/l) | Feof (ug/l) |
|---------------|-----------|------------|---------|---------|--------------|-------------|
| Rio Grande | 0 | 4.6 | 86.96 | 13.04 | 20.32 | 7.75 |
| | 2 | 5 | 84 | 16 | 12.08 | 15.99 |
| | 4 | 4.4 | 90.91 | 9.09 | 20.32 | 6.96 |
| Riacho Grande | 0 | 12.2 | 93.44 | 6.56 | 38.45 | 7.42 |
| | 2 | 13 | 90.77 | 9.23 | 36.25 | 13.97 |
| | 4 | 12.4 | 91.94 | 8.06 | 40.64 | 6.81 |

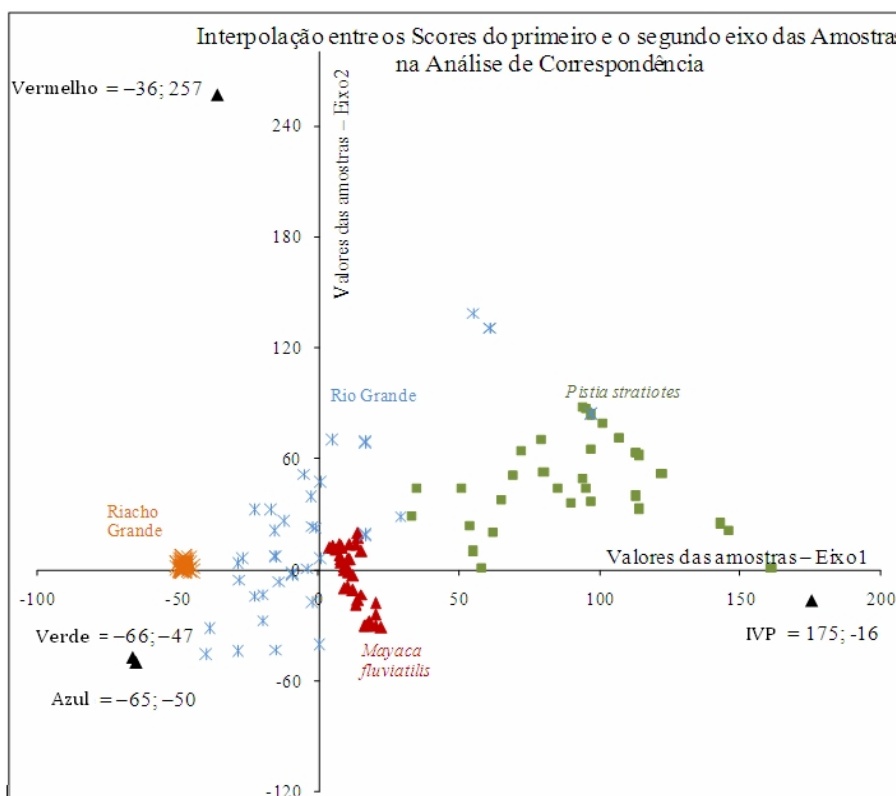


Figura 2: Interpolação entre os valores obtidos do primeiro e segundo eixo das amostras na Análise de Correspondência. Observa-se a posição de cada conjunto de pontos amostrais e a contribuição de cada faixa espectral do IKONOS-2 nas amostras estudadas.

Observando-se o gráfico resultante pode-se notar que houve o agrupamento das amostras conforme o alvo estudado, ou seja, foi possível distinguir as amostras das duas macrófitas e das

águas com diferentes qualidades. Além disso, foi possível observar que o IVP influenciou mais no agrupamento de *Pistia stratiotes*, enquanto que as faixas do Verde e do Azul influenciaram no agrupamento das amostras de água, tendo as amostras da macrófita submersa sido influenciadas tanto pelo IVP quanto pelo Verde e Azul.

A análise realizada permitiu confirmar a possibilidade de se distinguir entre os quatro alvos utilizando apenas sua resposta espectral em diferentes faixas do EEM. Esses resultados mostram que é possível, mesmo em imagens de baixa resolução espectral, diferir entre macrófitas emersas e submersas e entre águas com maior ou menor concentração de substâncias opticamente ativas.

3 RESPOSTAS ESPECTRAIS DE DIFERENTES ESPÉCIES DE MACRÓFITAS

Como visto até aqui, a interação da REM com diferentes alvos pode ser utilizada para caracterizar esses alvos espectralmente. Essa interação, como mencionado, se manifesta pela Reflectância que é registrada pelos sensores específicos de cada faixa espectral e é dependente principalmente da pigmentação, da anatomia foliar e do conteúdo de água das espécies. Estudos sobre a distinção de espécies de macrófitas utilizando apenas suas respostas espectrais podem oferecer subsídios para sua distinção em imagens de satélite, inclusive os de baixa resolução espectral, que são os mais comumente utilizados por pesquisadores da área e também nos de baixa resolução espacial, dependendo da extensão da área que se deseja avaliar. Para possibilitar a distinção espectral entre espécies, análises de campo, laboratoriais e espectroradiométricas precisam ser realizadas para os alvos de interesse. A seguir será apresentado um exemplo de análise da resposta espectral de espécies de macrófitas através de sua Reflectância ao longo do EEM.

O experimento foi realizado com folhas de diferentes espécies de macrófitas, visando à caracterização de suas respostas espectrais (APARICIO, 2007). Foram coletados indivíduos de espécies de macrófitas em diferentes locais de coleta, que incluíram os reservatórios e lagoas marginais do Complexo Billings, da Represa Guarapiranga, e lagos do Jardim Botânico e da Universidade de São Paulo. Os indivíduos foram coletados, identificados e mantidos em água até a análise espectral das folhas. As espécies estudadas foram: 1) Espécies com folhas emersas ou ao nível da água: *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms; *Eichhornia azurea* (Sw.) Kunth; *Pistia stratiotes* L.; *Heteranthera reniformis* Ruiz & Pav.; *Salvinia molesta* D.S.Mitch.; *Nymphaea mexicana* Zucc.; *Limnobium laevigatum* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Heine; *Myriophyllum brasiliense* Cambess.; e 2) Espécies com folhas imersas: *Egeria densa* Planch.; *Cryptocoryne beckettii* Thwaites ex Trimen; *Echinodorus bleheri* Rataj e *Hygrophila polysperma* (Roxb.) T. Anderson.

As diferentes espécies foram analisadas do seguinte modo: 10 indivíduos de cada espécie e 10 folhas de cada indivíduo coletado. Todas as análises foram feitas sob as mesmas condições laboratoriais, incluindo: amostragens em câmara escura, com iluminação controlada, uma mesma placa de referência para inferir a Reflectância, distâncias e ângulos de visada pré-definidos e os mesmos posicionamentos das folhas e dos indivíduos em relação ao sensor. O sensor utilizado foi o Ocen Optics, modelo USB2000, que coletava dados a cada 0,38 m no Espectro eletromagnético, tanto nas faixas do Visível como do IVP. Após o processamento dos dados, foi calculada a Reflectância média entre as 10 folhas de cada espécie, cujos resultados podem ser observados na Figura 3.

As diferenças entre as curvas espectrais nessa Figura indicam a possibilidade de diferenciação nas intensidades das Reflectâncias das espécies nas faixas do Azul, Verde, Vermelho e IVP. Considerando que os sensores orbitais operam em faixas de comprimentos de onda, foi efetuado o cálculo da média da resposta espectral da espécie dentro da faixa espectral dos satélites mais comumente utilizados. As respostas espectrais obtidas foram agrupadas nas faixas espectrais correspondentes àquelas encontradas nos satélites das séries LANDSAT, CBERS, IKONOS e SPOT, por exemplo, de modo a poderem ser úteis em estudos com sensores multiespectrais. Os intervalos em que houve o agrupamento foram: Azul: 450–520 nm, Verde: 520 – 590 nm, Vermelho: 630 – 690 nm, Infravermelho Próximo (IVP): 770 – 790 nm.

As intensidades de resposta espectral média de cada espécie, de acordo com as Faixas espectrais acima podem ser vistas na Figura 4. As diferenças entre as respostas espectrais das espécies foram estatisticamente significativas (ANOVA seguida de teste de Tukey, $p < 0,1$) para a maioria das espécies, mostrando o potencial desse tipo de análise para a distinção das macrófitas. Essas assinaturas espectrais podem servir de base para novos estudos sobre a distinção dessas mesmas espécies em imagens orbitais.

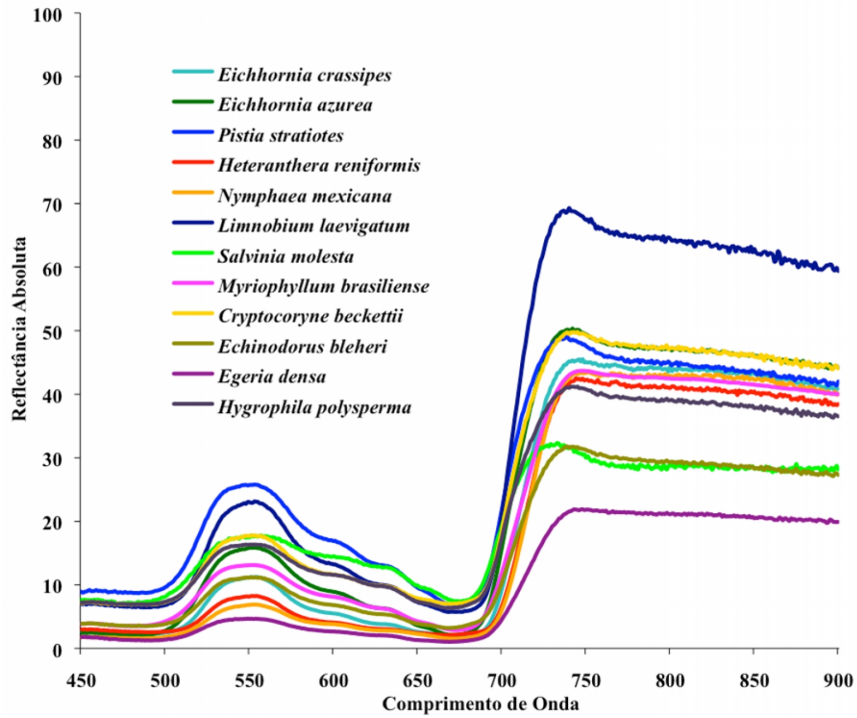


Figura 3: Resposta espectral média das espécies de macrófitas analisadas.

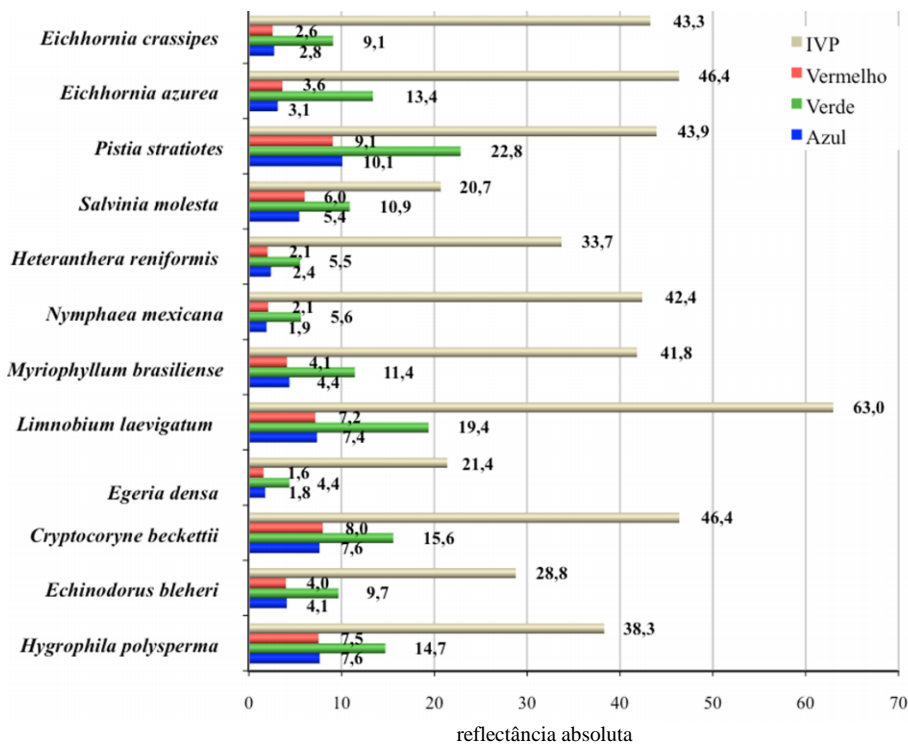


Figura 4: Respostas espectrais de espécies de macrófitas agrupadas segundo faixas espectrais de interesse.

Como visto até aqui, há efetivamente interações da REM com propriedades características de cada espécie vegetal que permitem distingui-las utilizando SR. Uma dessas propriedades é a estrutura anatômica das folhas, a qual tem sido estudada há décadas, e alguns estudos já mostraram a relação entre variações anatômicas e suas interações com comprimentos de onda na faixa do IVP. No próximo tópico será apresentado um estudo que possibilitou relacionar a resposta espectral de diferentes espécies de macrófitas no IVP com algumas de suas características anatômicas.

4 INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA ANATÔMICA FOLIAR NA RESPOSTA ESPECTRAL DE MACRÓFITAS

A característica espectral das macrófitas de refletirem em menor ou maior intensidade a REM na região do IVP está diretamente relacionada à estrutura anatômica foliar de cada espécie. Estudos envolvendo resposta espectral e características anatômicas da vegetação terrestre têm sido feitos desde a primeira metade do século passado. Em 1936 Turrel já discutia a diferenciação de tipos vegetais através das superfícies expostas ao ar no interior de folhas dicotiledôneas. Gates et al., em 1965, publicaram um artigo onde discutiam as propriedades espectrais das plantas, inclusive na região do IVP. Alguns anos depois, em 1969, Gausman et al. relacionaram a Reflectância de folhas de algodão com sua estrutura interna e verificaram a relação direta entre o aumento da espessura da folha e a Reflectância no IVP. Em 1970, Knipling mostrou que, quando infiltrados com água, os espaços intercelulares das folhas provocam uma maior absorção da REM, especialmente no IVP, um resultado que foi confirmado por DeLucia et al. (1996). Esses vários estudos buscavam a maior compreensão sobre os fatores envolvidos na resposta espectral dos vegetais. No exemplo que segue, foi investigada a influência de variáveis anatômicas foliares na resposta espectral de espécies de macrófitas no IVP (APARICIO, 2007).

Foram medidas as respostas espectrais de cinco espécies de macrófitas (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Nymphaea mexicana*, *Heteranthera reniformis*. e *Limnobium laevigatum*). As medidas espectroradiométricas foram feitas para 10 folhas de cada uma das espécies, nas condições controladas mencionadas anteriormente. Com os resultados espectroradiométricos em mãos, foram então separadas as folhas com mínima, média e máxima Reflectâncias no IVP para dar procedimento às análises anatômicas das mesmas. Nessas folhas foram feitos cortes transversais, os quais foram fixados seguindo a metodologia de Johansen (1940). As lâminas geradas foram analisadas com microscopia de luz e confocal, que permite a visualização tridimensional da estrutura foliar. Pode ser observado na Figura 5, a título de exemplo de produto do microscópio confocal, um dos cortes que foram utilizados para a obtenção de variáveis anatômicas. A utilização de óculos tridimensional possibilitará visualizar essa imagem em profundidade.

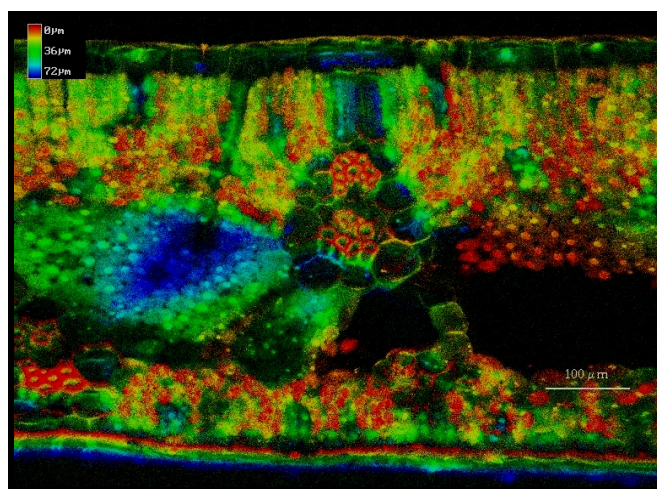


Figura 5: Imagem tridimensional gerada por microscopia confocal, para analisar a estrutura interna de folhas de *Eichhornia crassipes*. Na imagem observa-se um corte de folha cujas cores representam a variação de profundidade.

As medidas anatômicas realizadas em cada uma das três folhas selecionadas de cada espécie foram: Altura (ou espessura) foliar, Altura do mesofilo esponjoso, Área dos vacúolos de ar e Proporção de espaços aéreos presentes no parênquima foliar. Com os resultados obtidos foi realizada uma Análise Multivariada de Correspondência com o intuito de verificar qual ou quais das variáveis anatômicas influenciaram mais na distinção das cinco espécies de macrófitas. Utilizando os dados dos Eixos 1 e 2 resultantes da análise, foi possível identificar as associações entre as variáveis anatômicas (Figura 6). O que se pode observar nessa figura é que houve o agrupamento das amostras segundo a espécie de macrófita e que as características anatômicas Espessura da folha e Altura do mesofilo esponjoso foram as variáveis que agruparam as amostras conforme a espécie, sendo a Espessura da folha a variável que mais auxiliou nessa distinção.

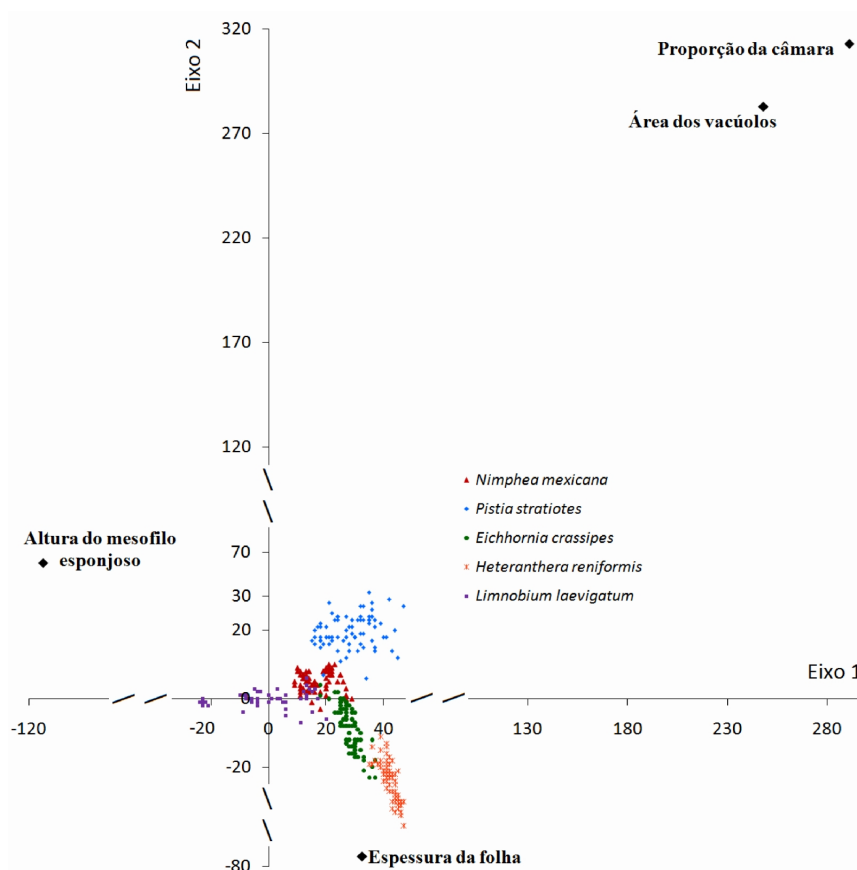


Figura 6: Resultado dos dois eixos da Análise Multivariada de Correspondência entre variáveis anatômicas das folhas de diferentes espécies de macrófitas.

Para se verificar a relação entre a Espessura da folha e a Reflectância no IVP, foram comparados os resultados de Reflectância no IVP das folhas amostradas mínima, média e máxima com a espessura dessas folhas (Figura 7).

Foi confirmada a correlação positiva significativa (ANOVA seguida de Tukey $p < 0,1$) entre o aumento da Espessura da folha e o aumento da Reflectância no IVP, corroborando o resultado anterior, de que a espessura da folha colabora efetivamente para a distinção das espécies estudadas na faixa do IVP.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados são importantes no sentido de confirmar o potencial de uso do SR para a distinção de espécies de macrófitas. É importante ressaltar as escalas de estudo possíveis no estudo da resposta espectral de macrófitas. São elas: Folha, Indivíduo, População e Comunidade. As

análises que podem ser realizadas em cada uma delas variam em função dos sensores e das tecnologias disponíveis, podendo ser assim resumidas:

- 1 – folha: inclui as características anatômicas e químicas (tipos e concentrações dos pigmentos, estrutura anatômica, presença e composição da cutícula, presença de espinhos, pelos, entre outras características);
- 2 – indivíduo: deve ser observada a resposta espectral do indivíduo como um todo, incluindo folhas (de diferentes idades, angulações, entre outras características), caule e todas as outras estruturas no campo de visada do sensor;
- 3 – população – deve considerar, além dos indivíduos e todas as suas variáveis, a resposta do corpo d'água em que se encontram e todas as propriedades opticamente ativas nele atuantes; e
- 4 – comunidade – deve reunir as respostas das diferentes populações de macrófitas, que podem estar mescladas ou homogêneas dentro de uma mesma área.

Apesar da carência de mais resultados que possibilitem a distinção de macrófitas em sensores orbitais, o estudo da resposta espectral das macrófitas mostra um potencial de aplicação prática muito grande, especialmente no Brasil, um país tropical, com grandes reservatórios hidrelétricos e corpos d'água com processos de eutrofização cada vez mais frequentes.

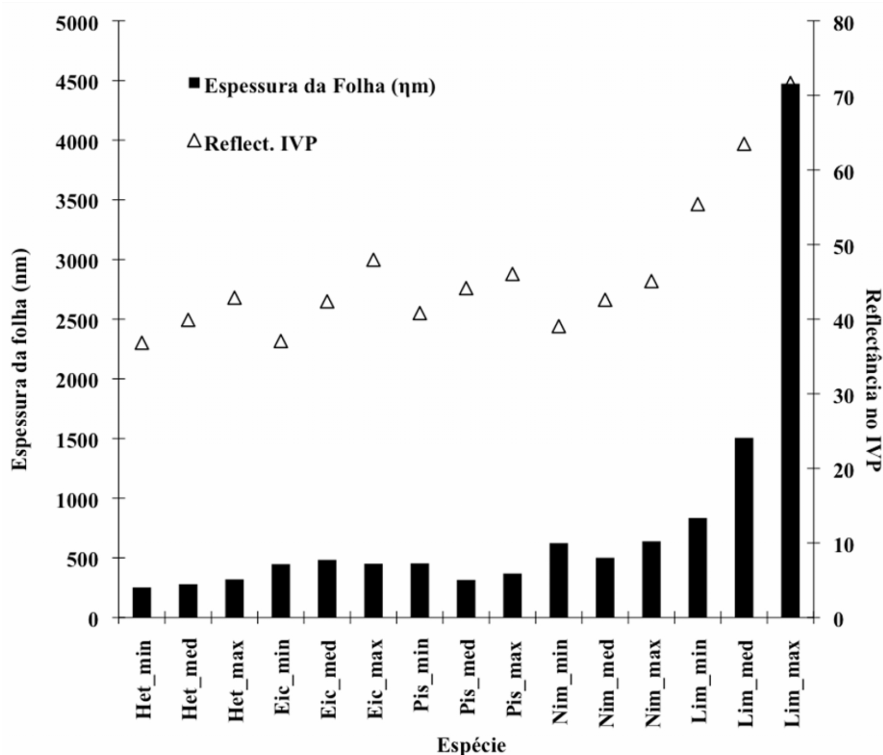


Figura 7: Relação entre a Reflectância de espécies de macrófitas no IVP (eixo X – em ordem crescente para a espécie) em relação às variáveis: Espessura da folha, Espessura do Parênquima esponjoso, e Proporção de Ar presente no parênquima. No eixo X se encontra a espécie e seu respectivo valor médio no IVP, sendo: Het = *Heteranthera reniformis*, Eic = *Eichhornia crassipes*, Nim = *Nymphaea mexicana*, Pis = *Pistia stratiotes*, Lim = *Limnobiium laevigatum*, min = mínimo, med = médio e max = máximo.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP e à CAPES, pelo suporte financeiro; à SABESP pelo apoio logístico para coletas; ao Prof. Timothy J. Malthus, do CSIRO, suporte técnico e pelo empréstimo do espectrorradiômetro; à Profa. Viviane Moschini Carlos pelos dados de qualidade d'água utilizados; ao Prof. Marcelo Luis Martins Pompêo pelo apoio durante as coletas e pela identificação das

espécies de macrófitas; ao Prof. Sérgio Tadeu Meirelles pelo apoio com as análises multivariadas; e ao Prof. Gregório Cardoso Tápias Ceccantini, ao Dr. Giuliano Maselli Locosselli, ao Me. Waldir Caldeira e a Márcio Valentim Cruz, que auxiliaram nas análises anatômicas e de microscopia confocal e de luz.

REFERÊNCIAS

- ABDON, M. M.; MEYER, M. Variação Temporal de Áreas Ocupadas por Macrófitas Aquáticas no Reservatório de Tucuruí Através de Dados do Satélite Landsat/TM. In: SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA. SAN CARLOS DE BARILOCHE, 4., Buenos Aires, 1989. **Anais...** Buenos Aires: SELLPER, 1989. v. 1, p. 545-548.
- ALBEROTANZA, L.; BRANDO, V. E.; RAVAGNAN, G.; ZANDONELLA, A. Hyperspectral aerial images. A valuable tool for submerged vegetation recognition in the Orbetello Lagoons, Italy. **Int. J. Remote Sensing**, v. 20, n. 3, p. 523-533, 1999.
- APARICIO, C. **Análise da resposta espectral de espécies de macrófitas**. 2007. 163 p. Tese (Doutorado em Ecologia de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BITENCOURT-PEREIRA, M. D. **Parâmetros limnológicos passíveis de serem monitorados através de sensores remotos orbitais**. 1992. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1992.
- BRIX, H.; SCHIERUP, H. H.. The use of aquatic macrophytes in water-pollution control. **AMBIO**, v. 18, n. 2, p. 100-107, 1989.
- CARVALHO, J. C.; BARBOSA, C.; NOVO, E. M.; MANTOVANI, J. E.; MELACK, J.; FILHO, W. P. Applications of quantitative analysis techniques to monitor water quality of Curuai Lake, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Melbourne, 2003. **Proceedings...** Melbourne: IEEE, 2003.
- DEKKER, A. G.; BUKATA, R. P.; JEROME, J. H.; POZDNYAKOV, D. V. Remote Sensing of Inland and Coastal Waters: 1: Twenty-eight years of technology push but still waiting for end-user pull. In: WORKSHOP ON RS AND RESOURCE MGMT IN NEARSHORE AND INLAND WATERS, Wolfville, 2001. **Proceedings...** Nova Scotia, 2001.
- DELUCIA, E. H.; NELSON, K.; VOGELMANN, T. C.; SMITH, W. K. Contribution of intercellular reflectance to photosynthesis in shade leaves. **Plant, Cell and Environment**, v. 19, p. 159-170, 1996.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1998. 602 p.
- EVERITT, J. H.; YANG, C.; ESCOBAR, D. E.; WEBSTER, C. F.; LONARD, R. I.; DAVIS, M. R. Using remote sensing and spatial information technologies to detect and map two aquatic macrophytes. **J. Aquat. Plant Manage.**, v. 37, p. 71-80, 1999.
- GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHLETER, J. C.; WEIDNER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.
- GAUSMAN, H. W.; ALLEN, W. A.; CARDENAS, R. Reflectance of cotton leaves and their structure. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, p. 19-22. 1969.
- GOODIN, D. G.; HAN, L.; FRASER, R. N.; RUNDQUIST, D. C.; STEBBINS, W. A.; SCHALLES, J. F. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogramm. Eng. Remote Sens.**, v. 59, p. 505-510, 1993.
- GRACIANI, S. D.; NOVO, E. M. L. M. Determinação da cobertura de macrófitas aquáticas em reservatórios tropicais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2509 - 2516.
- HENRY, R. (Ed.). **Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais**. Botucatu: FUNDIBIO/FAPESP, 1999.

- JAKUBAUSKAS, M.; KINDSCHER, K.; FRASER, A.; DEBINSKI, D.; PRICE, K. P. Close-range remote sensing of aquatic macrophyte vegetation cover. **Int. J. Remote Sensing**, v. 21, n. 18, p. 3533–3538, 2000.
- JAKUBAUSKAS, M. E.; PETERSON, D. L. Mapping and monitoring invasive aquatic plant obstructions in navigable waterways using satellite multispectral imagery. In: PECORA, 15./LAND SATELLITE INFORMATION, 4./ISPRS COMMISSION, 1./FIEOS, Denver, 2002. **Proceedings...** Denver, 2002.
- JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: Mc Graw Hill, 1940. 523 p.
- KADLEC, R.H.; WALLACE, S.. 2009. Treatment Wetlands. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL. Segunda ed., 1016 p.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sens. Environ.**, v. 1, p. 155-159, 1970.
- LEHMANN, A.; LACHAVANNE, J. B. Geographic information systems and remote sensing in aquatic botany. **Aquatic Botany**, v. 58, p. 195-207, 1997.
- LEHMANN, A. et al. Contribution of GIS to submerged macrophyte biomass estimation and community structure modeling, Lake Geneva, Switzerland. **Aquatic Botany**, v. 47, p. 99-117, 1994.
- LEHMANN, A., JAQUET, J. M.; LACHAVANNE, J. B. A GIS approach of aquatic plant spatial heterogeneity in relation to sediment and depth gradient, Lake Geneva, Switzerland. **Aquatic Botany**, v. 58, n. special, p. 347-361, 1997.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R.W. Remote sensing and image interpretation. 4. ed. New York: John Wiley, 2000.
- LIMA, I. B. T; NOVO, E. M. L. M.; BINS, L. Multitemporal TM image analysis to assess the spatial and temporal dispersion of floating macrophytes in Brazilian hydroelectric reservoirs. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., Santos, 1998. **Anais...**Santos: INPE, 1998. p. 145-154.
- MALTHUS, T. J.; DEKKER, A. G. First derivative indices for the remote sensing of inland water quality using high spectral resolution reflectance. **Environment International**, v. 21, n. 2, p. 221–232, 1995.
- MALTHUS, T. J.; GEORGE, D. G. Airborne remote sensing of macrophytes in Cefni Reservoir, Anglesey, UK. **Aquatic Botany**, v. 58, p. 317-332, 1997.
- MALTHUS, T. J.; GIRAULO, G.; LALOGGIA, G.; CLARK, C. D.; PLUMMER, S. E.; CALVO, S.; TOMASELLO, A. Can biophysical properties of submersed macrophytes be determined by Remote Sensing? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR MARINE AND COASTAL ENVIRONMENTS, 4., Orlando, 1997. **Proceedings...**Florida, 1997.
- MARTINS, D.; VELINI, E. D.; PITELLI, R. A.; TOMAZELLA, M. S.; NEGRISOLI, E. Ocorrência de plantas aquáticas nos reservatórios da Light-RJ. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 21, n. ed. esp. p. 105–108, 2003.
- MATHEW, S.; SCHMIEDER, K.; BOCKER, R. Application of Remote sensing and GIS in the classification of submerged macrophytes as an indicator of nutrient load in Lake Constance, Germany. In: CANADIAN COASTAL CONFERENCE, Kingston, 2003. **Proceedings...** Kingston, 2003.
- PALOMBO, C. R.; BITENCOURT-PEREIRA, M. D. Monitoramento de infestação de macrófitas aquáticas através de satélite. **Ambiente**, v. 6, n. 1, p. 49-54, 1992.
- REMILLARD, M. M.; WELCH, R. A. GIS technologies for aquatic macrophyte studies: I. database development and changes in the aquatic environment. **Landscape Ecology**, v. 7, n. 3, p. 151-162, 1992.
- RITCHIE, J. C.; COOPER, C. M. Remote sensing techniques for determining water quality: Application to TMDLs. In: TMDL SCIENCE ISSUES CONFERENCE, Alexandria, 2001. **Proceedings...** Alexandria: Water Environment Federation, 2001. p. 367-374
- THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. **Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas**. Maringá: Editora UEM, 2003.
- TURRELL, F. M. The area of the internal exposed surface of dicotyledon leaves. **American Journal of Botany**, v. 23, p. 255-264, 1936.

VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M. Mapeamento de macrófitas e paliteiros do Reservatório de Tucuruí (Pará), utilizando imagens RADARSAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais...**Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2633 - 2638.

VYMAZAL, J. (Ed.). **Wastewater treatment, plant dynamics and management in constructed and natural wetlands**. Dordrecht: Springer, 2008. 348 p.

WALDRON, M. C.; STEEVES P. A.; FINN J. T. **Use of thematic mapper imagery to assess water quality, trophic state, and macrophyte distributions in Massachusetts lakes**. Denver: USGS, 2001. 40 p. (Water Resource Investigations report 01-4016). Disponível em: < <http://water.usgs.gov/pubs/wri/wri014016>>. Acesso em: 27 maio 2013.

WELCH, R. A.; REMILLARD, M. M. Remote sensing and geographic information system for aquatic resource evaluation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**; v. 54, n. 2, p. 177-185, 1988.