



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUISTA FILHO”
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

FERNANDA SAYURI YOSHINO WATANABE

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COLUNA D'ÁGUA NA RESPOSTA
ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO AQUÁTICA SUBMERSA EM
CONDIÇÕES CONTROLADAS**



DISSERTAÇÃO

Presidente Prudente – SP

2012

FERNANDA SAYURI YOSHINO WATANABE

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COLUNA D'ÁGUA NA RESPOSTA
ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO AQUÁTICA SUBMERSA EM
CONDIÇÕES CONTROLADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Nilton Nobuhiro Imai

Presidente Prudente – SP

2012

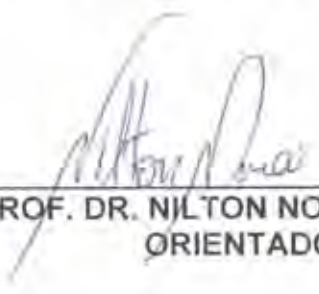
FICHA CATALOGRÁFICA

W294 Watanabe, Fernanda Sayuri Yoshino.
Estudo da influência da coluna d'água na resposta espectral da vegetação aquática submersa em condições controladas / Fernanda Sayuri Yoshino
Watanabe. - Presidente Prudente: [s.n], 2012
132 f.

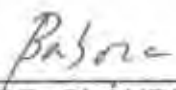
Orientador: Nilton Nobuhiro Imai
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Vegetação aquática submersa. 2. Dados radiométricos subaquáticos. 3. Atenuação da radiação. 4. Sensoriamento remoto I. Imai, Nilton Nobuhiro. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.

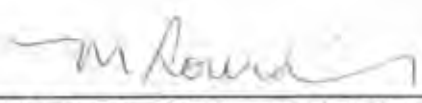
BANCA EXAMINADORA



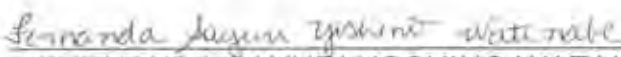
PROF. DR. NILTON NOBUHIRO IMAI
ORIENTADOR



PROF. DR. CLÁUDIO CLEMENTE FARIA BARBOSA
(INPE)



PROFA. DRA. MARIA DE LOURDES BUENO T. GALO
FCT/UNESP



FERNANDA SAYURI YOSHINO WATANABE

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 29 DE FEVEREIRO DE 2012

RESULTADO: APROVADA

*Dedico aos meus pais, Márcia e Roberto, e
aos meus irmãos, Fabiana e Fábio, pela
paciência, apoio, confiança e amor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho, em especial:

À Deus por tudo, por todas as portas que Ele me abre, por sempre me levantar nos momentos de tristeza e por me mostrar que sempre haverá uma estrada boa e segura para eu caminhar. Obrigada, ó Senhor Jesus, por sempre estar comigo!

Aos meus pais, Márcia e Roberto, e aos meus irmãos, Fabiana e Fábio, pela paciência constante (muita paciência, muita mesmo), pelo amor incondicional, pelo apoio e por serem meus alicerces.

Ao meu namorado, Ítalo, pelo incentivo, força, confiança, pelo carinho e proteção, muitas vezes não compreendidos, e por me fazer sentir que tenho alguém com quem contar.

Ao meu orientador, Prof. Nilton Nobuhiro Imai, muito obrigada por toda confiança depositada nesses últimos seis anos, pelas palavras de incentivo. Obrigada por tudo que me ensinou e todas as oportunidades que me abriu.

Aos professores do programa de pós-graduação, em especial, às professoras Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo e Vilma Mayumi Tachibana pelo conhecimento compartilhado, importante para o desenvolvimento dessa dissertação, e aos professores Paulo César Rocha e Renata Ribeiro de Araújo por emprestarem os equipamentos de coleta de dados limnológicos, sem os quais não seria possível realizar os trabalhos de campo.

Aos colegas, Letícia, Luiz Henrique, Alex, e aos professores Nilton Imai e Robinson Luiz Pitelli pelo auxílio nos levantamentos de campo. À Rejane e ao Adilson pela ajuda com o processamento dos dados. Ao Ítalo, Ligia, Letícia e ao professor Edmur por contribuírem de alguma forma na correção do texto.

Aos colegas da pós-graduação pelas conversas e experiências trocadas, em especial aos amigos do grupo de pesquisa, Letícia, Luiz Henrique, Ligia, Rejane, Alex, Érica, Lauriana, Monique e George.

À FCT/UNESP e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, em especial aos funcionários: Cátia e Thais (departamento de Cartografia), Erynat, Márcia, Ivonte, Cinthia e André (seção de pós-graduação), Chiquinho, Edivaldo e Marcos (motoristas), por serem sempre prestativos e quebrarem um grande galho.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo durante o desenvolvimento do trabalho de mestrado.

À FEPAF pelo auxílio financeiro para os levantamentos de dados de campo.

*Se eu ando em meio à tribulação, tu me
refazes a vida; estendes a mão contra a ira
dos inimigos; a tua destra me salva.
(Salmos, 138:7)*

*O que sabemos é uma gota. O que ignoramos
é um oceano.
(Issac Newton)*

RESUMO

A implantação de usinas hidrelétricas requer a inundação de grandes extensões de terra para formação de reservatórios, gerando diversos impactos tanto sobre os ecossistemas aquáticos quanto terrestres. O desenvolvimento desequilibrado da vegetação aquática submersa se destaca pelos problemas econômicos gerados às empresas geradoras de energia hidrelétrica. Em alguns períodos do ano, as macrófitas aquáticas se desprendem do substrato, causando obstrução das grades de proteção de entrada da água para as turbinas. Além do custo para a remoção mecanizada da vegetação, esse processo requer a interrupção de geração de energia. Assim, a implantação de um plano de manejo de macrófitas submersas torna-se indispensável conhecer a distribuição espacial dessas plantas é uma etapa fundamental. As imagens de Sensoriamento Remoto são comumente utilizadas no mapeamento da vegetação terrestre. Entretanto, a atenuação da radiação pela água dificulta a aplicação desses dados na identificação de plantas aquáticas submersas. Neste sentido, o presente estudo visa compreender melhor a influência da coluna d'água sobre a contribuição da resposta espectral da vegetação aquática submersa. O estudo de caso foi realizado no córrego Ferreira, no reservatório de Nova Avanhandava, Rio Tietê/SP. Foram utilizados dados de reflectância e medidas subaquáticas, da irradiância ascendente e descendente e da radiância ascendente. Sobre as curvas de reflectância foram aplicadas as técnicas de remoção do ruído espectral, análise derivativa, remoção do contínuo espectral, razão de bandas e classificação, adotando abordagens por análise de agrupamento e mapeamento por ângulo espectral (SAM). Nos dados subaquáticos foram aplicadas análises de correlação e ajustados modelos de regressão em relação à altura da coluna d'água sobre o dossel. Verificou-se que o uso de dados do infravermelho próximo foi prejudicado devido à alta atenuação desses comprimentos de onda pela água, enquanto que as regiões do amarelo e do vermelho apresentaram bons resultados na identificação das macrófitas submersas. A classificação com SAM apresentou melhor desempenho em comparação à análise de agrupamento, pois o segundo não foi capaz de distinguir curvas sem plantas de curvas que apresentam plantas a uma altura de coluna d'água sobre o dossel superior a 3 metros. Neste sentido, conclui-se que a atenuação da radiação pela água prejudica a identificação da vegetação aquática submersa, mas foi verificado que mesmo em locais com plantas muito profundos há contribuição da radiação da vegetação.

Palavras Chave: Vegetação aquática submersa, dados radiométricos subaquáticos, atenuação da radiação, sensoriamento remoto

ABSTRACT

Deployment of a hydroelectric requires the flooding of large extensions of land to form reservoirs, generating several impacts on both aquatic and terrestrial ecosystems. The unbalanced development of submerged aquatic vegetation stands out economic problems for hydroelectric energy companies. In some periods of the year, the aquatic macrophytes are detached from the substrate, causing obstruction of the guardrails in the entry of water to the turbines. Besides the cost of mechanical removal of vegetation, this process requires the interruption of energy generation. Thus, the implementation of a management plan to control submerged macrophytes becomes indispensable and the mapping of the spatial distribution of them is an important step. The remote sensing images are commonly used for terrestrial vegetation mapping. However, the attenuation of radiation by water hinders the use of these data in identification of submerged aquatic plants. In this sense, this study aims to understand the influence of the water column on the contribution of the spectral response of submerged aquatic vegetation. The case study was accomplished in the stream Ferreira, Nova Avanhandava reservoir, Tietê River, São Paulo state. It was used a set of underwater data, upward and downward irradiance, upward radiance and reflectance. Some techniques like spectral noise removal, derivative analysis, spectral continuum removal, and classification, adopting approaches for cluster analysis and spectral angle mapping (SAM), were applied on the reflectance data. The correlation analysis was applied on the underwater data, as well as a regression model was fitted in relation to height of water column over the canopy were fitted. It was verified that the use of data acquired from the region of near infrared was impaired due to high attenuation of these wavelengths caused by water, while the region of the yellow and red wavelengths present good results when identifying of submerged macrophytes. Classification using SAM showed better performance compared to cluster analysis, because the second one was not able to distinguish curves without plants of curves of plants acquired at places where height of water column over the canopy is upper than 3 meters. In this sense, it was concluded that the light attenuation difficulties the identification of submerged aquatic vegetation, even in very deep water with plants there is spectral contribution of radiation of the vegetation.

Keywords: Submerged aquatic vegetation, underwater radiometric data, attenuation of radiation, remote sensing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas de reflectância da água com materiais (a) argiloso e (b) siltoso (LODHI et al., 1997)	25
Figura 2 – Curvas espectrais de águas com (a) alta e (b) baixa concentração de clorofila-a (RUNDQUIST et al., 1996).....	26
Figura 3 – Interação de um feixe de luz com uma fina camada do meio aquático (MOBLEY, 1994).....	29
Figura 4 – Propriedades ópticas inerentes da água pura. Adaptado de Dekker (1993)	31
Figura 5 – Decréscimo exponencial da irradiância descendente (KIRK, 1994)	32
Figura 6 – Dimensão dos componentes presentes em águas naturais. Adaptado de Gregory (2006).	33
Figura 7 – Representação da geometria do campo de luz (MOBLEY, 1994).....	35
Figura 8 – Mudanças na (a) irradiância descendente e (b) ascendente em termos de função de espalhamento e absorção. Adaptado de Dekker et al., 2002	37
Figura 9 – (a) Contribuição da radiância de outras direções. (b) Fator de forma. Adaptado de Dekker et al., 2002.....	38
Figura 10 – Processo de transferência radiativa (KIRK, 1994).....	40
Figura 11 – Macrófitas aquáticas (ESTEVES, 1998).....	44
Figura 12 – Curvas de reflectância de plantas aquáticas (PEÑUELAS et al., 1993)	45
Figura 13 – Assinatura espectral da <i>Ceratophyllum demersum</i> acima e abaixo da superfície da água (HAN e RUNDQUIST, 2003)	46
Figura 14 – Curvas de reflectância da <i>Ceratophyllum demersum</i> com diferentes alturas de coluna d'água sobre o dossel (a) sem e (b) com algas (HAN e RUNDQUIST, 2003)	47
Figura 15 – Curvas de reflectância de macrófitas submersas com diferentes níveis de cobertura do dossel (YUAN e ZHANG, 2008)	48
Figura 16 – Distância entre agrupamentos (dissimilaridade) por (a) ligação simples, (b) ligação completa e (c) ligação média (Adaptada de Johnson e Wichern, 2007)	49
Figura 17 – Aplicação de análise derivativa (DEMETRIADES-SHAH et al., 1990).....	52
Figura 18 – Espectros da soja. (a) Reflectância; segunda derivada (b) com separação de banda de 2,5 nm e (c) 25 nm	53
Figura 19 – Feições de clorofila algal em curvas de primeira derivada (RUNDQUIST et al., 1996)	55
Figura 20 – (a) Curvas de reflectância e (b) de 1ª derivada de macrófitas submersas tomadas em diferentes alturas de coluna d'água sobre o dossel (HAN, 2002).....	56
Figura 21 – Remoção do contínuo espectral (KRUSE et al. 1993a)	57
Figura 22 – Ângulo formado entre o vetor do espectro teste em relação ao vetor das curvas de referência (BARBOSA, 2005).....	59
Figura 23 – Esquema de aquisição de dados ecobatimétricos (JENSEN, 2009).....	60

Figura 24 – Reservatório de Nova Avanhandava, no Rio Tietê, Estado de São Paulo	63
Figura 25 – (a) Cadeia de reservatórios no Rio Tietê; (b) gráfico da média anual de medidas de profundidade de disco de Secchi e concentrações de clorofila-a e fósforo	64
Figura 26 – Área de estudo – córrego Ferreira, reservatório de Nova Avanhandava	65
Figura 27 – Suporte de sustentação do sonar e da antena GPS	66
Figura 28 – Equipamentos necessários para tomada de medidas subaquáticas. (a) Espectrorradiômetro, cabo de fibra óptica e lente; (b) lentes para medidas de irradiância e radiância.....	67
Figura 29 – (a) Aquisição de radiância e irradiância espectral; (b) controle da profundidade e inclinação na tomada dos dados	68
Figura 30 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.....	70
Figura 31 – Vegetação aquática submersa. (a) Cabomba sp., (b) Ceratophyllum demersum, (c) Egeria najas e (d) Chara sp.	79
Figura 32 – Infestação por Ceratophyllum demersum no córrego Ferreira, (a) em Out/2010, quando a planta atingiu sua capacidade suporte, e (b) Set/2011	80
Figura 33 – (a) Ceratophyllum demersum encoberta totalmente por perifíton (Set/ 2011); (b) perifíton (Out/2010).....	81
Figura 34 – Análise de agrupamento – curvas de reflectância usadas como dados de entrada	82
Figura 35 – Curvas de reflectância – classificação por análise de agrupamento usando dados de reflectância.....	83
Figura 36 – Contínuo removido dos intervalos (a) 585 – 685 nm e (b) 727 – 793 nm	86
Figura 37 – Dendograma da análise de agrupamento usando parâmetros de banda do intervalo espectral 585 – 685 nm	88
Figura 38 – Curvas de reflectância – classificação usando como dados de entrada os parâmetros de banda do contínuo removido no intervalo 585 – 685 nm	89
Figura 39 – Curvas de 1ª derivada da reflectância – classificação usando como dados de entrada os parâmetros de banda obtidos do contínuo removido no intervalo 585 – 685 nm ...	91
Figura 40 – Curvas de 2ª derivada da reflectância – classificação usando como dados de entrada os parâmetros de banda obtidos do contínuo removido no intervalo 585 – 685 nm ...	94
Figura 41 – Classificação das curvas de reflectância segundo a classificação pelo SAM	97
Figura 42 – Agrupamentos das curvas de 1ª derivada da reflectância segundo a classificação pelo SAM.....	99
Figura 43 – Agrupamento das curvas de 2ª derivada da reflectância segundo a classificação pelo SAM.....	101
Figura 44 – Simulação de classificação – intervalos de banda do WorldView-2	103
Figura 45 – Simulação de classificação – intervalos de banda do RapidEye.....	104
Figura 46 – Medidas subaquáticas do ponto M01, de (a) irradiância descendente, (b) irradiância ascendente e (c) radiância ascendente	105

Figura 47 – Medidas subaquáticas do ponto M24, de (a) irradiância descendente, (b) irradiância ascendente e (c) radiância ascendente	107
Figura 48 – Medidas de radiância ascendente tomadas na profundidade de 0 cm	108
Figura 49 – Análise de regressão para 560 nm. Transformação Box-Cox.....	110
Figura 50 – Ajuste de modelo de regressão dos dados em 700 nm e (a) análise de resíduos	111
Figura 51 – Ajuste de linha de tendência linear (a) e exponencial (b)	112
Figura 52 – Análise dos resíduos do modelo exponencial – 700 nm	113
Figura 53 – Medidas estimadas de (a) reflectância de sensoriamento remoto e (b) reflectância de subsuperfície	114
Figura 54 – Reflectância de Sensoriamento Remoto.....	115
Figura 55 – Reflectância de irradiância de subsuperfície.....	116
Figura 56 – Razão de irradiâncias dos pontos M02 (a) e M04 (b)	117
Figura 57 – Razão de irradiâncias do ponto M24.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis radiométricas	28
Tabela 2 – Coeficientes de atenuação difusa vertical	36
Tabela 3 – Principais métodos hierárquicos de agrupamento	50
Tabela 4 – Dados da Usina Hidrelétrica de Nova Avanhandava	63
Tabela 5 – Descrição da amostragem	73
Tabela 6 – Bandas dos sensores multiespectrais WorldView-2 e RapidEye	77
Tabela 7 – Parâmetros de banda para o intervalo 585 – 686 nm	87
Tabela 8 – Classificação por Mapeamento do Ângulo Espectral (SAM).....	96
Tabela 9 – ANOVA – M01(Radiância ascendente X Profundidade de medida)	109
Tabela 10 – ANOVA – M24 (Radiância ascendente X Profundidade de medida)	111
Tabela 11 – Análise de Variância do ajuste exponencial – M24.....	112

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Objetivos específicos.....	16
1.2 Estado da Arte.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. Limnologia de Reservatórios	20
2.2. Sensoriamento Remoto de Águas Interiores.....	22
2.2.1. Comportamento espectral da água	22
2.2.1.1. Matéria orgânica dissolvida.....	23
2.2.1.2 Sólidos em suspensão	24
2.2.1.3 Pigmentos fotossintetizantes	26
2.2.2. Atenuação da luz no meio aquático.....	27
2.2.2.1 Propriedades ópticas inerentes	29
2.2.2.2 Propriedades ópticas aparentes	34
2.2.2.3 Propriedades ópticas inerentes difusas	37
2.2.3 Teoria da transferência radiativa	38
2.2.4 Águas opticamente rasas	40
2.3. Vegetação Aquática Submersa	43
2.4 Sensoriamento Remoto de Macrófitas Submersas.....	44
2.5 Análise Multivariada.....	48
2.5.1 Análise de Agrupamento.....	48
2.5.2 Análise de regressão.....	50
2.6 Tratamento de Dados Espectrorradiométricos.....	51
2.6.1 Remoção de ruído.....	51
2.6.2 Análise derivativa.....	52
2.6.3 Remoção do contínuo.....	56
2.6.4 Mapeamento por ângulo espectral.....	58
2.7 Ondas Acústicas e Ecobatimetria.....	59
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1. Materiais	62
3.1.1 Área de estudos	62
3.1.2 Equipamentos e aplicativos.....	65
3.2 Procedimentos Metodológicos.....	68
3.2.1 Levantamentos de dados em campo.....	71

3.2.2 Processamento dos dados	75
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1 Características do Ambiente de Coleta dos Dados	79
4.2 Primeira Análise de Agrupamento – Dados de Reflectância.....	81
4.3 Segunda Análise de Agrupamento – Parâmetros de Banda do Contínuo Removido	85
4.3.1 Derivada de primeira ordem – classificação por análise de agrupamento utilizando parâmetros de banda do contínuo removido	90
4.3.2 Derivada de segunda ordem – classificação por análise de agrupamento utilizando parâmetros de banda do contínuo removido	93
4.4 Classificação por Mapeamento por Ângulo Espectral	94
4.4.1 Primeira derivada – classificação por SAM	98
4.4.2 Segunda derivada – classificação por SAM	100
4.5 Simulação Simplificada de Classificação de Dados Multiespectrais	102
4.6 Análise dos Dados de Irradiância e Radiância.....	104
4.7 Ajuste de Modelos de Atenuação da Radiação ao longo da Coluna D'água.....	109
4.8 Estimativa de reflectância de sensoriamento remoto, reflectância de irradiância de subsuperfície e razão de irradiâncias	114
5. CONCLUSÕES	119
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

1. INTRODUÇÃO

O crescimento econômico brasileiro, relacionado principalmente ao setor industrial, vem alavancando a demanda energética nacional. Tal fato, combinado à disponibilidade de recursos hídricos do Brasil, estimulou a construção de diversas usinas hidrelétricas, aproveitando assim, o grande potencial hidráulico dos rios.

Para a melhor geração desse tipo de energia, faz-se necessário o represamento de uma grande massa de água, provocando assim, a inundação de extensas áreas. Porém, são vários os impactos ambientais decorrentes desse processo, afetando tanto o ecossistema aquático quanto o terrestre.

Em termos hidrodinâmicos, o represamento de rios transforma um ambiente lótico (de correnteza) em um ambiente lêntico (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2008) ou semi-lêntico, onde o fluxo de água do rio é controlado pela abertura das comportas das usinas hidrelétricas. Nesse processo de criação do lago ocorre a inundação do solo marginal, o qual possui altas concentrações de nutrientes comparados às concentrações presentes no substrato submerso no leito do rio.

Nos grandes rios paulistas é comumente observada a implantação de sistemas de reservatórios em cascata, em que várias lagoas artificiais são construídas em um único rio ou em conjunto de canais que compartilham uma vazão em comum (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2008). Nesses sistemas, verifica-se que os diferentes reservatórios apresentam características ambientais próprias, em termos de presença de nutrientes na água e no substrato, bem como de desenvolvimento de algas e de macrófitas aquáticas. Nos primeiros reservatórios da cascata, verifica-se predomínio de algas e vegetação aquática flutuante, onde há alta concentração de nutrientes na água bem como maior turbidez da água (THOMAZ, 2006). Por outro lado, nos últimos reservatórios da cascata nos reservatórios verifica-se um aumento da transparência da água e, conseqüentemente, aumento da penetração de luz na coluna d'água, tornando um ambiente propício ao desenvolvimento de espécies submersas (HENRY E MARICATO, 1996 apud THOMAZ, 2006). Outros estudos, concluem que os ambientes de águas paradas, combinadas com presença de substrato com altas concentrações de nutrientes, podem levar ao desenvolvimento acelerado de plantas aquáticas submersas também, comumente, chamadas de macrófitas imersas ou vegetação aquática submersa (CAVENAGHI *et al.*, 2003).

O crescimento descontrolado desse tipo de vegetação gera grandes problemas às usinas hidrelétricas, uma vez que, em determinados períodos do ano essas plantas se

despreendem do substrato e obstruem as grades de proteção de entrada de águas para as turbinas (VELINI, 2000). Além dos altos custos com a remoção mecânica da vegetação, esse processo requer a interrupção da geração de energia, provocando prejuízos econômicos ao setor energético. Nesse sentido, é importante a implantação de planos de manejo das macrófitas aquáticas (PITELLI *et al.*, 2008) e controle dessas plantas que sejam eficientes e apresentem custos menores em relação os gastos atuais com o emprego de métodos de remoção de plantas das grades.

Assim, conhecer as principais características das plantas, bem como sua distribuição espacial, é essencial para o desenvolvimento e implantação de um plano de controle e monitoramento de plantas aquáticas no reservatório. Entretanto, apenas a realização de levantamentos de dados em campo apresenta algumas limitações quanto à obtenção de informações adequadas sobre a distribuição espacial e temporal em grandes áreas, como as formadas nos grandes reservatórios de usinas hidrelétricas. Por outro lado, a combinação dos dados levantados *in loco* com imagens de Sensoriamento Remoto constitui uma alternativa, nos casos em que se trabalha com grandes extensões superficiais de água (JENSEN, 2001).

A utilização de imagens de Sensoriamento Remoto seria uma boa alternativa para o monitoramento da distribuição espaço-temporal de vegetação aquática submersa, tendo como elemento dificultador a alta atenuação da radiação pela água, afetando a resposta espectral das macrófitas submersas. Alguns trabalhos realizados mostram a dificuldade na identificação e no mapeamento dessas plantas em reservatórios e estuários (ACKLESON e KLEMAS, 1987; PEÑUELAS *et al.*, 1993; HESTIR *et al.*, 2008, ROTTA, 2011). A detecção de plantas submersas em imagens depende tanto da profundidade da coluna d'água quanto dos constituintes opticamente ativos presentes em águas naturais que modificam as propriedades ópticas aparentes e inerentes. Esses dois fatores são responsáveis pela atenuação da radiação incidente dentro do corpo d'água (KIRK, 1994; MOBLEY, 1994).

Por esses motivos, a extração de informações sobre a vegetação aquática submersa através de imagens de sensoriamento orbital e aerotransportado é uma tarefa complexa (ACKLESON e KLEMAS, 1987; MALTHUS e GEORGE, 1997; WILLIAMS *et al.*, 2003; HESTIR *et al.*, 2008, ROTTA, 2011). Para isso, torna-se necessário entender melhor o comportamento espectral da água; dos componentes opticamente ativos presentes nos reservatórios e da vegetação que a compõe. Outro fator que provoca limitações quanto ao uso de imagens são os processos ópticos, de absorção e de espalhamento, que interferem sobre a radiação incidente na coluna d'água, prejudicando a identificação dessas plantas em

bandas espectrais, convencionalmente, utilizadas em Sensoriamento Remoto de águas (HESTIR *et al.*, 2008).

Entretanto, supõe-se que a presença de plantas aquáticas submersas provoque alterações de alguma natureza sobre a assinatura espectral da água, permitindo verificar a presença ou ausência de plantas e até mesmo identificar características associadas a uma determinada espécie. Em estudos desenvolvidos por Lee *et al.* (2001); Brando e Dekker (2003), foram gerados modelos semi-analíticos de recuperação da concentração de diversos parâmetros de qualidade da água, além da batimetria e composição do substrato, em águas opticamente rasas (MARITORENA *et al.*, 1994; DEKKER *et al.*, 2002), utilizando imagens de alta resolução espectral. Nesse contexto, espera-se obter resultados que possam dar suporte ao uso de imagens de Sensoriamento Remoto no monitoramento da vegetação aquática submersa.

Nesse sentido, a hipótese desse trabalho é de que seja possível classificar (discriminar) o sinal da vegetação aquática submersa utilizando a região espectral do visível, em ambientes cujas alturas da coluna d'água sobre o dossel sejam consideradas, fisicamente, como águas opticamente rasas. Os resultados desse estudo permitirão compreender melhor o fenômeno de atenuação da radiação e contribuir para o aprimoramento do conhecimento sobre o uso de imagens de Sensoriamento Remoto para monitoramento de plantas aquáticas submersas.

1.1 OBJETIVOS

O presente estudo visou realizar avaliação da resposta espectral da vegetação aquática submersa, com diferentes alturas de coluna d'água sobre o dossel da planta, registrada por um sistema sensor hiperespectral de campo, em ambiente de águas opticamente rasas.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo contemplam:

- Compreender e sistematizar o conhecimento teórico relacionado com os mecanismos de transferência radiativa na água;

- Determinar os comprimentos de onda mais adequados para detecção de plantas aquáticas submersas na área de estudos;
- Subsidiar a aquisição de imagens de sensoriamento remoto, em termos de intervalos de banda mais adequados e período de aquisição dos dados e
- Discriminar o sinal da vegetação aquática submersa e avaliar diferentes abordagens de classificação hiperespectral.

1.2 ESTADO DA ARTE

Existem trabalhos acadêmicos que reforçam a importância de estudos aprofundados do Sensoriamento Remoto em ecossistemas aquáticos, em termos de mapeamento de plantas aquáticas submersas e entendimento dos processos ópticos que ocorrem ao longo da coluna d'água. Orth e Moore (1983) publicaram um dos primeiros trabalhos sobre o estudo da distribuição espacial e temporal da vegetação aquática submersa, na Baía de Chesapeake na década de 1970, nos Estados Unidos. A infestação de estuários por macrófitas submersas não é um problema atual, sendo observada desde a década de 1930. Nesse estudo, a baía foi dividida em setores, onde foram realizadas as amostragens dos dados limnológicos, de sedimentos e densidade de plantas imersas, sendo verificado, a partir das análises temporais, um decréscimo de todas as espécies, devido ao estresse do sistema estuário motivado pela alteração na qualidade da água.

A partir da década de 1980, as imagens de Sensoriamento Remoto começaram a ser introduzidas no mapeamento da vegetação aquática submersa. Ackleson e Klemas (1987) foram um dos primeiros a utilizar imagens multiespectrais na detecção de macrófitas imersas. Eles compararam os resultados obtidos com o uso de imagens multiespectrais dos sensores MSS e TM, dos satélites da série Landsat, no mapeamento de plantas aquáticas submersas. Nesse trabalho, eles puderam observar a influência do aumento da altura de coluna d'água sobre dossel na resposta espectral da vegetação aquática submersa, provocando erros na classificação das imagens.

Visto as dificuldades em se mapear a vegetação imersa empregando imagens de Sensoriamento Remoto, Peñuelas *et al.* (1993) realizaram um estudo sobre a reflectância espectral de diferentes espécies de macrófitas emersas, submersas e flutuantes, em termos de densidade de planta e qualidade da água. Eles utilizaram dados dos canais 1 (visível) ou 2 (infravermelho próximo), do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*),

do satélite meteorológico NOAA e aplicaram várias técnicas de processamento de dados, entre elas: análise multivariada; índice espectral; índices de vegetação; bem como análise espectral das curvas e análise derivativa. Entretanto, apenas algumas foram aplicadas para detectar espectralmente as macrófitas imersas. O trabalho constatou que a análise discriminante separa bem os três tipos de plantas aquáticas, enquanto que a análise das assinaturas espectrais e o NDVI são ineficientes na discriminação espécies emersas e flutuantes, enquanto que as submersas, devido à baixa reflectância, apresentam um baixo valor para este índice.

Han e Rundquist (2003) analisaram o comportamento espectral da *Ceratophyllum demersum*, em diferentes alturas de coluna d'água sobre o dossel da vegetação e concentrações de clorofila algal, analisando a influência da coluna d'água sobre a resposta espectral das plantas, utilizando curvas de reflectância coletadas com espectrorradiômetro *ASD FieldSpec*. Para entender a associação entre a profundidade da planta e a resposta espectral foram analisados os coeficientes de correlação para cada banda e aplicada análise de variância (ANOVA). A partir dos resultados, constataram que os comprimentos de onda de 538 nm e 706 nm são os que melhor representam o comportamento espectral da vegetação aquática submersa.

Alguns trabalhos foram realizados empregando imagens de sensores remotos aerotransportados (MALTHUS e GEORGE, 1997; WILLIAMS *et al.*, 2003; HESTIR *et al.*, 2008). Nesse sentido, Malthus e George (1997) realizaram o monitoramento da distribuição de macrófitas aquáticas no Reservatório de Cefni, no Reino Unido, usando imagens do sensor aerotransportado *Daedalus*, com 11 bandas espectrais. Primeiramente, eles aplicaram uma função discriminante, sobre alguns intervalos das assinaturas espectrais de 20 amostras coletadas em campo dos diferentes tipos de vegetação aquática observadas, para distinguir entre submersa, flutuante e emersa. Sobre as imagens foi feita classificação supervisionada por distância mínima. A partir dos resultados obtidos com o processamento das curvas espectrais e das imagens, concluiu-se que o sensor aerotransportado utilizado tinha bom potencial no mapeamento de espécies de macrófitas em águas claras.

Williams *et al.* (2003) realizaram mapeamento da vegetação aquática submersa utilizando imagens do sensor hiperespectral aerotransportado *HyMap*. Eles tiveram dificuldades durante as etapas de identificação espectral das plantas aquáticas imersas devido à presença clorofila algal, que apresenta feições semelhantes a da vegetação, bem como de sólidos suspensos que aumenta a complexidade óptica da coluna d'água. Hestir *et al.* (2008) utilizaram imagens hiperespectrais, também do sensor *HyMap*, e várias técnicas de

processamento digital de imagens e de dados espectrais na identificação de diferentes tipos de plantas aquáticas. O procedimento metodológico adotado para detecção das macrófitas submersas incluiu a utilização de uma árvore de decisão binária, bem como das técnicas de análise de mistura espectral (SMA), mapeamento do ângulo espectral (SAM), razões de banda e remoção do contínuo espectral. Assim, como em outros trabalhos, eles também encontraram dificuldade em mapear a distribuição da vegetação aquática submersa, devido ao decréscimo da reflectância em relação ao aumento da profundidade.

Alguns trabalhos utilizaram imagens de alta resolução espacial, do satélite *Quickbird*, no mapeamento da vegetação aquática submersa. Yuan e Zhang (2008) utilizaram essas imagens no mapeamento da distribuição da cobertura de macrófitas imersas, do Parque Internacional da Planície de Inundação de Chongming, na China. Foi realizado um ajuste do modelo por regressão linear, mostrando a dependência entre a cobertura da planta e a reflectância, adotando uma imagem de alta resolução espacial *Quickbird*, para mapear a distribuição da vegetação imersa. Dogan *et al.* (2009) também utilizaram imagens de alta resolução do *Quickbird* para identificação e mapeamento da vegetação aquática submersa, adotando abordagem de classificação não-supervisionada por IsoData.

Outra abordagem utilizada no mapeamento de plantas aquáticas submersas é através de modelos de recuperação a partir da inversão de modelos bio-ópticos. A partir desses modelos é possível recuperar a concentração de vários parâmetros ópticos da qualidade da água (LEE *et al.*, 2001; BRANDO e DEKKER, 2003), a batimetria e a composição do substrato do ambiente aquático (LEE *et al.*, 2007; BRANDO *et al.*, 2009) simultaneamente. Em geral, esses modelos relacionam a reflectância de irradiância de superfície às concentrações de componentes opticamente ativos (BRANDO e DEKKER, 2009).

Estes trabalhos demonstram o potencial das imagens de Sensoriamento Remoto no mapeamento e monitoramento do desenvolvimento de plantas aquáticas invasoras. Entretanto, todos os estudos se depararam com as dificuldades em se identificar espectralmente a vegetação aquática submersa em imagens de Sensoriamento Remoto, devido aos processos ópticos que ocorrem com a radiação na coluna d'água.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente estudo aborda temas como o comportamento espectral da vegetação aquática submersa em lagos artificiais e sua detecção a partir do uso de dados de Sensoriamento Remoto e ferramentas de tratamento de dados hiperespectrais adquiridos em nível de campo. Dessa forma, neste capítulo são apresentadas as principais características limnológicas de reservatórios de hidrelétricas; alguns conceitos de aplicações de Sensoriamento Remoto em águas interiores, destacando o comportamento espectral da água e das plantas aquáticas submersas, bem como os processos ópticos de atenuação da radiação e aquisição de dados hidroacústicos.

2.1. LIMNOLOGIA DE RESERVATÓRIOS

Os reservatórios são ecossistemas artificiais construídos pelo homem, segundo um propósito socioeconômico e de múltiplos usos, que interferem na qualidade da água; nos mecanismos de funcionamento hidrológico e na sucessão das comunidades aquáticas do rio e da bacia hidrográfica em que se encontram. As principais características relacionadas ao funcionamento dos reservatórios são: o tipo de construção; o tempo de retenção da água; o período de enchimento e os impactos decorrentes dos usos múltiplos sobre a qualidade da água. A tecnologia empregada nessas construções interfere nas características físicas, químicas e biológicas dos corpos d'água, cuja magnitude dos impactos está diretamente relacionada com as dimensões do reservatório e o tipo de tecnologia adotada (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

No caso dos reservatórios de usinas hidrelétricas, pode haver diversos benefícios socioeconômicos, como: geração de energia; atividades recreativas e esportivas; pesca comercial; controle de inundações e suprimento de água (NASCIMENTO *et al.*, 2011). Além das finalidades a que se destina a construção dos reservatórios, esses ainda apresentam funcionalidades sobre o ecossistema aquático (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2008):

- a. Auxiliam na purificação da água dos rios, eliminando impurezas, uma vez que a baixa vazão permite a decantação de sedimentos em suspensão, matéria-orgânica, excesso de nutrientes, entre outros poluentes;
- b. Servem como local de recreação: natação, canoagem, pesca, remo, vela, etc;

- c. Funcionam como recurso biológico: berçário de peixes, aquicultura e produção de plantas aquáticas ornamentais e
- d. Agregam, ainda, valor estético, podendo preservar algumas espécies da fauna e flora.

No entanto, a construção de um reservatório em um rio provoca vários impactos ambientais sobre a qualidade da água, modificando seus aspectos físicos, químicos e biológicos (LIU *et al.*, 2003). Segundo Stech *et al.* (2011), a implantação de reservatórios promove alteração do uso e cobertura do solo das áreas adjacentes, o que aumenta o aporte de poluentes.

Tanto as áreas a montante quanto a jusante são altamente afetadas pela construção de uma barragem. Somente após muitos quilômetros de distância do ponto barrado, o rio passa a retomar suas características naturais. Essa distância é chamada de ponto de reinício. No entanto, devido à construção de múltiplas barragens ao longo de um mesmo rio, essa condição natural do corpo d'água dificilmente é retomada (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

Neste contexto, é empregado o termo sistema de reservatórios para definir múltiplas barragens que são conectadas hidrológicamente, estando em geral, relacionado a um uso comum específico, como a geração de energia elétrica. Quando a disposição de diversas barragens encontra-se sobre um mesmo rio, isto é chamado de reservatórios em cascata. Os sistemas de reservatórios múltiplos são formados por um conjunto de reservatórios que se localizam ao longo do trecho de um canal hídrico ou de um sistema de canais, mas que apresentam uma vazão em comum (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

Nos reservatórios em cascata ocorre a diminuição dos poluentes ao longo da sequência espacial, pois o reservatório a montante funciona como um quimiostato, retendo parte dos poluentes, sedimentos e nutrientes (nitrogênio e fósforo), melhorando a qualidade das águas cascata abaixo (SENDACZ *et al.*, 2006). O benefício desse efeito, causado pelos reservatórios que retêm o excesso de material, do ponto de vista dos impactos gerados, no entanto, é discutível, pois os rios (sistema natural), diferentemente dos lagos, são ambientes em que a água; os nutrientes; os sedimentos e os organismos fluem continuamente no canal e com certa velocidade (NEIFF, 1996 apud FEITOSA *et al.*, 2006).

A alteração de um ambiente lótico para lântico pode causar efeitos sobre a produção primária, estruturação das cadeias alimentares e saúde dos usuários dos ecossistemas aquáticos (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 2008). Entre outros impactos ambientais gerados, destacam-se: mudanças na morfologia do canal; regime de fluxo e nível da coluna d'água no corpo d'água; elevação longitudinal da temperatura; desenvolvimento de

estratificação térmica; depleção de oxigênio em zonas profundas; aumento da transparência da água e acúmulo de nutrientes e matéria orgânica nos sedimentos. As comunidades bióticas sofrem influência pela construção de reservatórios, principalmente, as de grande porte. Entre os principais efeitos, destaca-se a diminuição da riqueza de organismos, em especial os fitoplânctons, zooplânctons e zoobentos (NOGUEIRA *et al.*, 2006).

Segundo Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008), os reservatórios se diferem dos lagos devido à presença de um mecanismo de saída da água, pela superfície ou pelo fundo – ou seja, por vertedouros e turbinas, respectivamente –, gerando gradientes horizontais e verticais, como a estratificação hidráulica. Nesse sentido, o estudo desse ecossistema é importante para compreensão dos impactos sobre a sucessão de comunidades onde ocorrem alterações rápidas no funcionamento limnológico, nos pulsos naturais e artificiais, bem como interações dos sistemas físicos, químicos e biológicos, tanto a montante quanto a jusante da represa.

2.2. SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁGUAS INTERIORES

As aplicações do Sensoriamento Remoto, tanto em águas interiores quanto em águas oceânicas, são restritas a um intervalo relativamente pequeno do espectro óptico comparado com as aplicações em alvos terrestres. Essa característica está relacionada à baixa irradiância solar nos comprimentos de onda menores a 400 nm e pela combinação da menor energia solar com o aumento brusco da absorção da luz pela água a partir de 850 nm, aproximadamente. Por este motivo, o intervalo entre 400 – 850 nm é, geralmente, escolhido em pesquisas que visam determinar métodos de estimação de parâmetros limnológicos dentro da coluna d'água, em Sensoriamento Remoto (DEKKER, 1993).

2.2.1. Comportamento espectral da água

A água pura, ou seja, que não contém matéria orgânica ou inorgânica apresenta um comportamento espectral próprio, absorvendo e/ou espalhando seletivamente a radiação incidente ou a luz solar descendente na coluna d'água, promovendo alterações tanto na sua intensidade quanto na sua composição espectral. A característica espectral mais notável da água pura é a baixa absorção e espalhamento incidente da coluna d'água que ocorre nos

comprimentos da onda de 400 – 500 nm, com o valor mínimo, aproximadamente, em 460 – 480 nm. Dessa forma, o espalhamento molecular da luz violeta e azul (<520 nm) e a significativa absorção da luz nos comprimentos de onda do verde, amarelo, laranja e vermelho (520 – 700 nm) pela água são responsáveis pela coloração azulada da água pura. Essa cor é especialmente evidente em águas oceânicas puras e corpos d'água profundos, não túrbidos. Dessa forma, é verificada que a água pura possui uma característica de absorção baixa na região do azul e verde, tendo um aumento a partir do comprimento de onda 550 nm, sobretudo na região do vermelho (JENSEN, 2009).

Por outro lado, as águas naturais apresentam uma grande variedade de constituintes. A presença de uma mistura desses materiais na água dificulta a extração de informação quantitativa sobre esses constituintes a partir de dados de Sensoriamento Remoto. Portanto, mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos corpos d'água, provocam mudanças na interação da radiação eletromagnética com a água e, por consequência, na sua cor (JENSEN, 2009). A variação na resposta espectral da cor das águas interiores, segundo Morel e Prieur (1977), está relacionada aos constituintes presentes na coluna d'água. Esses elementos chamados de componentes opticamente ativos são os responsáveis pelas diferentes respostas espectrais da água registradas pelos sensores.

Os principais componentes opticamente ativos que alteram a curva da água pura são: matéria orgânica dissolvida; material em suspensão; pigmentos fotossintetizantes; dentre outros (JENSEN, 2009). Medidas dessas variáveis limnológicas *in situ* podem ser usadas no estudo de feições espectrais e da sensibilidade delas às mudanças de concentração desses constituintes, buscando encontrar uma relação entre as variáveis espectral e limnológicas. Medidas como a profundidade de disco de Secchi e turbidez fornecem uma estimativa indireta da presença desses materiais na água.

2.2.1.1. Matéria orgânica dissolvida

A concentração de matéria orgânica dissolvida em águas naturais é consequência de qualquer atividade fotossintética do fitoplâncton (autóctone) ou de entradas de material de origem terrestre (alóctone). Do total de matéria orgânica resultante da fotossíntese planctônica, mais de 20% pode ser liberado para o ambiente aquático através da egestão metabólica (BUKATA *et al.*, 1995).

Cerca de 80% dos principais restos da decomposição das células fitoplanctônicas (acima das condições aeróbicas) resultam substâncias como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), amônia (NH_3) e água (H_2O), entre outros. Além disso, o processo de decomposição resulta na criação de uma variedade de polímeros complexos, geralmente referidos como substâncias húmicas. Essas substâncias húmicas compreendem tanto frações solúveis como insolúveis em água. A fração insolúvel é composta por partículas em suspensão de vários tamanhos e pesos moleculares. A fração solúvel compreende o carbono orgânico dissolvido, na forma de ácidos húmicos e ácidos fúlvicos. As frações solúveis e insolúveis das substâncias húmicas são bem similares em sua composição química, embora diferentes em seus pesos moleculares (BUKATA *et al.*, 1995).

A presença de substâncias húmicas solúveis em água é, facilmente, perceptível em águas naturais devido à variação dos tons de amarelo que são verificadas nessas águas. Como consequência desse matiz amarelo, o húmus aquático dissolvido é, geralmente, referido como substância amarela, sendo também chamado por diferentes termos como *gelbstoff*, matéria húmica aquática, ácidos orgânicos amarelos, ácidos humilimnicos, *gilvin* entre outros (BUKATA *et al.*, 1995).

Essa matéria-orgânica, solúvel ou dissolvida, em águas continentais é carregada na forma de plumas de ácidos húmicos e fúlvicos pelo rio, sendo que a quantidade e a composição dessas substâncias variam sazonalmente (GITELSON, 1993). Segundo Rudorff (2006), a presença de substâncias húmicas provoca uma absorção seletiva da radiação nos comprimentos de onda mais curtos, do espectro óptico. Além disso, a feição mínima de reflectância no infravermelho próximo, por volta de 810 nm, provavelmente, é causada pelo retroespalhamento da matéria-orgânica combinada com a absorção desse comprimento de onda pela água (RUNDQUIST *et al.*, 1996).

2.2.1.2 Sólidos em suspensão

A formação do material em suspensão em águas continentais depende, na maior parte das vezes, do fluxo de saída do rio, do tipo de sedimento de fundo e da circulação de água no próprio corpo d'água (GITELSON *et al.*, 1993). Segundo Doxaran *et al.* (2002), o espalhamento da luz incidente pelas partículas em suspensão provocam aumento da turbidez da água, acarretando atenuação da luz dentro da coluna d'água, podendo inibir a produção primária.

O material em suspensão é constituído por minerais, partículas finas ou grânulos em saltação, que provocam um efeito de espalhamento na coluna d'água, (RUDORFF, 2006). Doxaran *et al.* (2002) verificaram que com o aumento da concentração de sólidos em suspensão, houve um aumento na reflectância de Sensoriamento Remoto em todo intervalo de comprimento de onda analisado (400 – 900 nm). O intervalo de 700 – 900 nm, referente à região do infravermelho próximo, apresentou as maiores variações, com característica de máxima reflectância ao redor de 800 nm.

Han (1997) encontrou uma relação aproximadamente linear entre a concentração de sólidos suspensos e a reflectância nos comprimentos de onda de 720 e 900 nm. No entanto, quando há uma alta variabilidade das condições do ambiente, como variações da irradiância e presença de nuvens, uma alternativa é gerar modelos que relacionam a concentração de sedimentos com a derivada da reflectância (CHEN *et al.*, 1992).

A Figura 1 apresenta as curvas de percentual de reflectância obtidos em dois experimentos, que mostram o comportamento espectral da água com diferentes concentrações de: (a) material argiloso e (b) material siltoso. Observa-se na Figura 1a que, quanto maior a concentração de argila, maior a reflectância no comprimento de onda de 650 nm. Entretanto, em termos percentuais de reflectância, a água com partículas de silte (Figura 1b) apresenta uma reflectância bem maior do que material argiloso, com um pico máximo também em 650 nm.

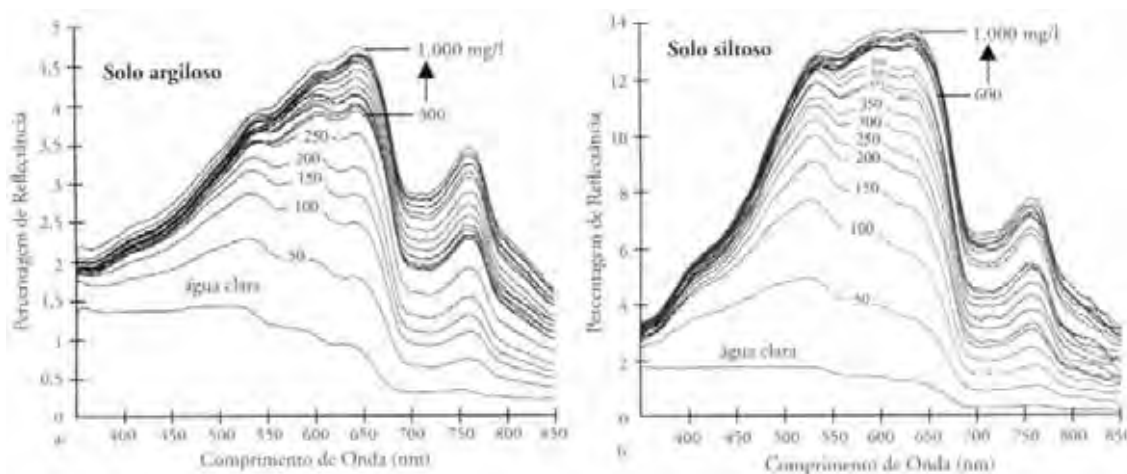


Figura 1 – Curvas de reflectância da água com materiais (a) argiloso e (b) siltoso (LODHI *et al.*, 1997)

Em termos da forma da assinatura espectral, comparando o comportamento espectral de ambas, são verificadas características espectrais bem definidas que as distinguem. A partir de uma concentração de, aproximadamente, 350 mg/L de solo siltoso na água, observa-se a formação de um platô no intervalo de 520 – 650 nm. Enquanto que para águas

com solo argiloso esse platô se mantém até a concentração de 250 mg/L, aumentando mais a reflectância no comprimento de onda da luz vermelha, conforme a concentração de argila sobe.

2.2.1.3 Pigmentos fotossintetizantes

Os pigmentos foto ou quimiossintetizantes provocam uma diminuição da reflectância na banda do azul (400 – 515 nm) e um aumento na faixa do verde (515 – 600 nm) (JENSEN, 2009). Esse aumento de reflectância na região do verde ocorre devido a um processo de espalhamento no interior das células do fitoplâncton. Um dos pigmentos mais conhecidos nos estudos limnológicos é a clorofila-*a* (Cl-*a*) que está presente nos fitoplânctons e é um dos indicadores para avaliação da qualidade da água (RUDORFF, 2006). Mesmo em ambientes oligotróficos, cuja carga de nutrientes é pequena, a baixa concentração de algas é facilmente detectada em assinaturas espectrais da água (MOREL e BRICAUD, 1986).

Alguns estudos foram feitos com o objetivo de caracterizar o comportamento espectral da clorofila algal em condições de ambiente controlado (GITELSON, 1992; HAN *et al.*, 1994; RUNDQUIST *et al.*, 1996). A Figura 2 mostra curvas típicas de clorofila-*a*, em alta (a) e baixa (b) concentração na água.

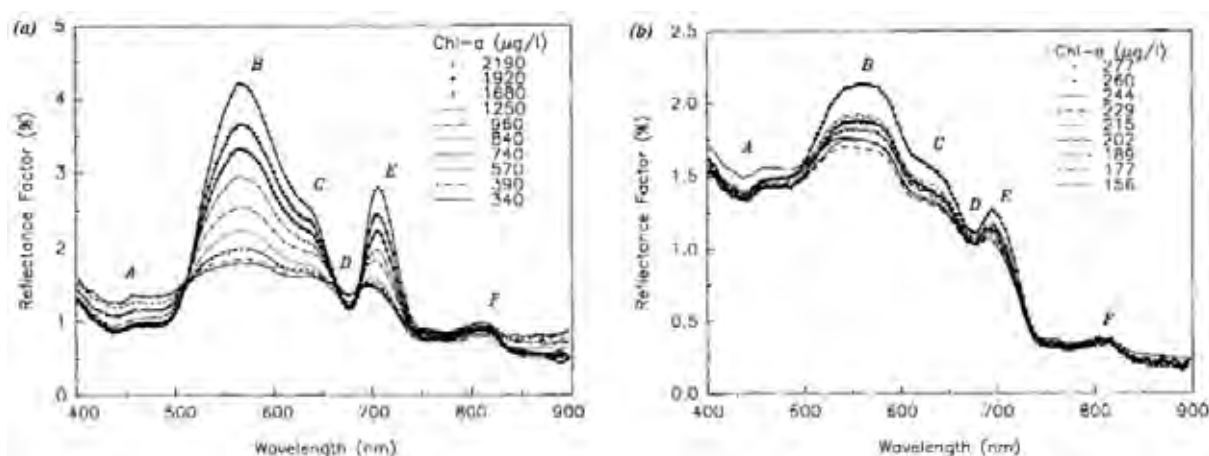


Figura 2 – Curvas espectrais de águas com (a) alta e (b) baixa concentração de clorofila-*a* (RUNDQUIST *et al.*, 1996)

A máxima refletividade na luz verde, ao redor de 560 nm (Figura 2), é decorrente da baixa absorção desse comprimento de onda pela alga (GITELSON, 1992; RUNDQUIST *et al.*, 1996), em conjunto com um aumento do retroespalhamento quando a concentração desse componente cresce (GITELSON *et al.*, 1993). O valor mínimo em 675 nm, segundo Gitelson

(1992) e Rundquist *et al.* (1996), está relacionado com a absorção desse comprimento de onda pela clorofila-*a*. Entretanto, de acordo com Gitelson *et al.* (1993), quando há um aumento na concentração desse pigmento, esse pico pode ser deslocado para comprimentos de onda maiores, podendo atingir valores próximos a 715 nm.

A feição de máxima reflectância próxima à região do *red edge* (vermelho limítrofe), em torno de 700 nm, (Figura 2) está associada ao espalhamento pelo fitoplâncton (GITELSON *et al.*, 1993; RUNDQUIST *et al.*, 1996). Entretanto, nos casos de concentrações muito altas de clorofila-*a*, a feição em 700 nm pode sofrer influência tanto do espalhamento quanto da absorção desse comprimento de onda por este pigmento (GITELSON *et al.*, 1993).

Por outro lado, o pico de absorção em 620 nm em curvas espectrais de águas naturais, de acordo com Gitelson (1992), está associado à presença de ficocianina, um pigmento acessório encontrado em alguns tipos de algas, como as cianobactérias. E inflexões próximas a 640 nm são causadas devido ao retroespalhamento associado tanto aos pigmentos acessórios quanto às substâncias orgânicas dissolvidas.

2.2.2. Atenuação da luz no meio aquático

Em águas naturais, tanto doces quanto salinas, há uma mistura de materiais particulados e dissolvidos que modificam a radiação. Ambos, partículas e solutos, apresentam uma grande variabilidade de tipos e concentrações, sendo alguns deles opticamente ativos. Consequentemente, as propriedades ópticas das águas naturais exibem variações espaço-temporais e raramente se assemelham às condições da água pura (MOBLEY, 1994). Assim, as diferentes respostas espectrais de águas naturais são influenciadas por fenômenos ópticos que ocorrem com a luz devido à presença de diversas partículas opticamente ativas, em diferentes concentrações. Essa variação é representada por diferentes valores de brilho em imagens multiespectrais (BARBOSA, 2005).

Essas propriedades ópticas da água são separadas em duas classes: inerentes e aparentes. As propriedades ópticas inerentes (*IOP's – Inherent Optical Properties*) são aquelas que dependem apenas do meio e, portanto, são independentes do campo de luz ambiente dentro do meio. As propriedades ópticas aparentes (*AOP's – Apparent Optical Properties*) são aquelas que dependem tanto do meio (*IOP's*) quanto da estrutura geométrica (direcional) do campo de luz ambiente, mas que apresentam estabilidade e feições regulares, suficientemente úteis para descrever o corpo d'água (MOBLEY, 1994).

Quando a luz adentra o corpo d'água, ela sofre interações de espalhamento e absorção com os materiais presentes (partículas e moléculas), modificando a distribuição da radiação de subsuperfície, bem como do fluxo de fótons que se propaga no meio aquático. A combinação dos processos de absorção e espalhamento reduz a intensidade da radiação, enquanto os processos de espalhamento, também, mudam a característica direcional da distribuição da luz (BUKATA *et al.*, 1995).

As duas grandezas radiométricas essenciais para compreender os processos de atenuação são a radiação e a irradiância. A radiação é (L) é a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada em uma dada direção. E a irradiância (E) é a quantidade de fluxo radiante incidente sobre uma superfície por unidade de área da superfície (JENSEN, 2009). A Tabela 1 apresenta a definição matemática de algumas variáveis radiométricas e variações dadas pela geometria do campo de luz (DEKKER *et al.*, 2002).

Tabela 1 – Variáveis radiométricas

Símbolo	Descrição/Definição	Unidades
L	Radiância (espectral) $L \equiv \frac{\partial^4 Q}{\partial t \partial \Omega \partial A \partial \lambda}$	$Wm^{-1}sr^{-1}nm^{-1}$
μ	Cosseno do ângulo zenital $\mu \equiv \cos \theta$	–
E_d	Irradiância descendente $E_d = \int_{\Xi_d} \mu L(s) d\Omega$	$Wm^{-1}nm^{-1}$
E_u	Irradiância ascendente $E_u = \int_{\Xi_u} \mu L(s) d\Omega$	$Wm^{-1}nm^{-1}$
E_0	Irradiância escalar $E_0 = \int_{\Xi} L(s) d\Omega$	$Wm^{-1}nm^{-1}$
E_{0d}	Irradiância escalar descendente $E_{0d} = \int_{\Xi_d} L(s) d\Omega$	$Wm^{-1}nm^{-1}$
E_{0u}	Irradiância escalar ascendente $E_{0u} = \int_{\Xi_u} L(s) d\Omega$	$Wm^{-1}nm^{-1}$

Fonte: Adaptada de Dekker *et al.*, 2002.

Na Tabela 1, a L é dada como função da energia radiante (Q) dividido pelo tempo (t), ângulo sólido (Ω), área (A) e comprimento de onda (λ). Nota-se também que a irradiância pode ser distinguida em relação ao seu sentido ascendente (u - *upward*) ou descendente (d - *downward*), definindo do hemisfério (Ξ) a ser integrado, e ainda como escalar (topo da atmosfera) ou incidente na superfície (depende do ângulo zenital solar, θ).

Esses processos de atenuação que ocorrem ao longo da coluna d'água são responsáveis pela disponibilidade de radiação que é registrada pelos sensores remotos, sendo uma das razões pela qual as macrófitas imersas muitas vezes não são detectadas em imagens

de sensoriamento remoto. Nesse sentido, serão discutidas algumas das principais propriedades ópticas aparentes e inerentes da água utilizadas em oceanografia e limnologia para explicar a atenuação da luz.

2.2.2.1 Propriedades ópticas inerentes

As propriedades ópticas inerentes de águas naturais são aquelas independentes do campo de luz ambiente, ou seja, não são influenciadas por mudanças na distribuição angular do fluxo radiante (KIRK, 1994; MOBLEY, 1994). Por outro lado, apresentam uma relação direta com as concentrações de várias substâncias dissolvidas e suspensas, presentes dentro da coluna d'água (MOREL e BRICAUD, 1986).

Essas propriedades da luz, para comprimentos de onda específicos, são definidos, basicamente, em termos de coeficiente de absorção, a [m^{-1}], coeficiente de espalhamento, b [m^{-1}], e função de espalhamento volumétrico, $\beta(\psi; \lambda)$, que descrevem a distribuição angular do fluxo espalhado resultando do processo primário de espalhamento (DEKKER, 1993).

A definição das três propriedades ópticas inerentes fundamentais (coeficiente de absorção; coeficiente de espalhamento e função de espalhamento volumétrico) se baseia no comportamento de um feixe de luz paralelo incidente sobre uma fina camada do meio aquático (KIRK, 1994). Neste esquema, é considerado que um pequeno volume ΔV de água, de largura Δr , é iluminado por um feixe colimando de luz monocromática do fluxo radiante espectral $\Phi_i(\lambda)$ [W/nm] (MOBLEY, 1994), ilustrado na Figura 3.

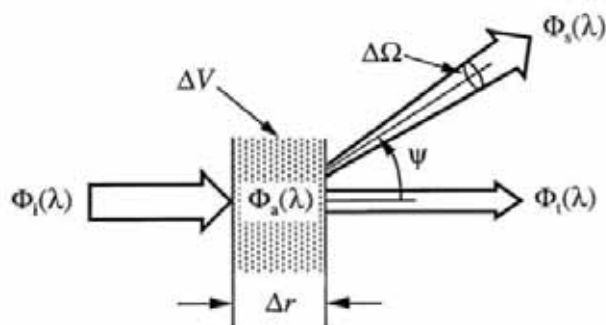


Figura 3 – Interação de um feixe de luz com uma fina camada do meio aquático (MOBLEY, 1994)

Uma parte, $\Phi_a(\lambda)$, do fluxo incidente $\Phi_i(\lambda)$, é absorvido pelo volume d'água ΔV . Outra parcela $\Phi_s(\psi; \lambda)$, é espalhado por um feixe de ângulo ψ , chamado de ângulo de

espalhamento, cujos valores abrangem o intervalo de $0 \leq \psi \leq \pi$. O restante do fluxo $\Phi_t(\lambda)$ é transmitido através do meio sem que haja mudança de direção do feixe de luz.

Considerando $\Phi_s(\lambda)$ como o fluxo total do que é espalhado em todas as direções e assumindo que não ocorra espalhamento inelástico, isto é, que os fótons não sofram uma mudança no comprimento de onda durante o processo de espalhamento, o teorema de conservação de energia mostra que o fluxo incidente $\Phi_i(\lambda)$ pode ser representado pela somatória dos fluxos absorvido, espalhado e transmitido (Equação 1) (MOBLEY, 1994).

$$\Phi_i(\lambda) = \Phi_a(\lambda) + \Phi_s(\lambda) + \Phi_t(\lambda) \quad (1)$$

A fração do fluxo incidente absorvido dentro do volume ΔV é chamada de absorptância espectral $A(\lambda)$, matematicamente, definida pela Equação 2.

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (2)$$

Da mesma maneira, a escaterância espectral $B(\lambda)$ que é a porção do fluxo incidente espalhado é dado por (Equação 3):

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_s(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}, \quad (3)$$

e a transmitância espectral $T(\lambda)$, a razão entre o fluxo transmitido pelo incidente, é definida pela Equação 4.

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (4)$$

As propriedades ópticas inerentes, geralmente, empregadas em hidrologia óptica são os coeficientes de absorção (a) e espalhamento espectral (b), que são, respectivamente, a absorptância e escaterância espectral por unidade de distância no meio. A Figura 4 mostra o gráfico do comportamento dessas duas propriedades ópticas inerentes e do coeficiente de atenuação da água pura. Nota-se que os coeficientes de atenuação e absorção seguem o mesmo padrão de comportamento espectral, enquanto o coeficiente de espalhamento decai quase exponencialmente à medida que aumenta o comprimento de onda.

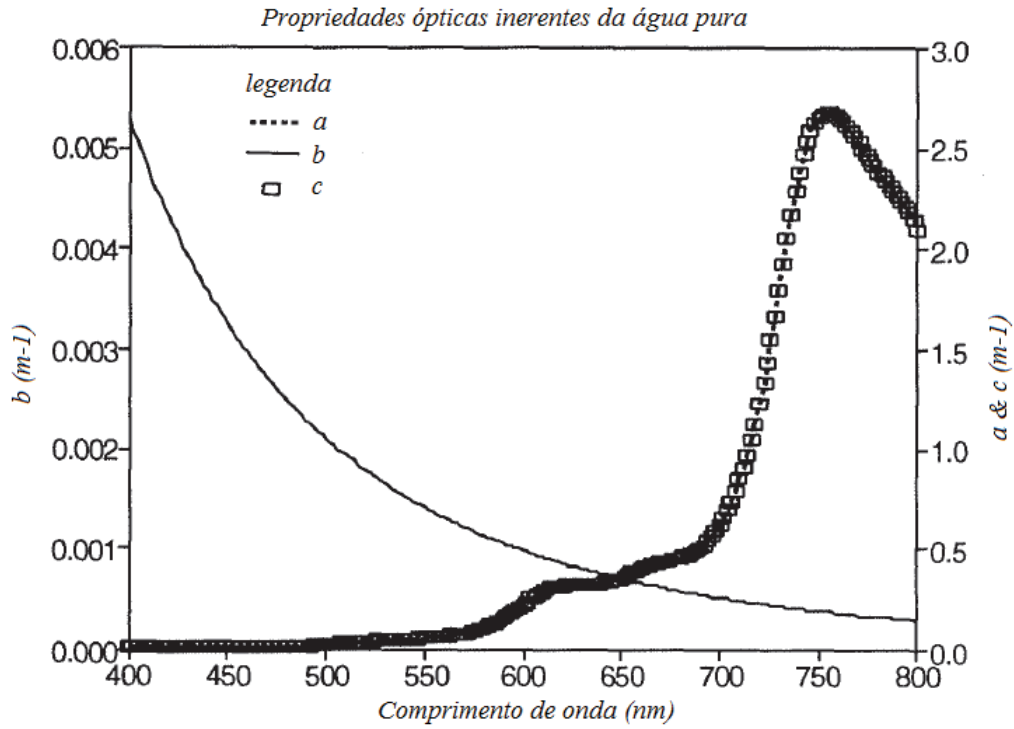


Figura 4 – Propriedades ópticas inerentes da água pura. Adaptado de Dekker (1993)

As Equações 5 e 6 definem os coeficiente de absorção, $a(\lambda)$ e espalhamento espectral $b(\lambda)$ (KIRK, 1994).

$$a(\lambda) = \frac{\Delta A(\lambda)}{\Delta r}, [m^{-1}] \quad (5)$$

$$b(\lambda) = \frac{\Delta B(\lambda)}{\Delta r}, [m^{-1}]. \quad (6)$$

Conceitualmente, a soma dos coeficientes de absorção e espalhamento resulta no coeficiente de atenuação (c) que representa a perda total de luz (Tabela 1) (KIRK, 1994; MOBLEY, 1994; BUKATA *et al*, 1995). Esse coeficiente também pode ser expresso considerando um meio iluminado, perpendicularmente, por um feixe luz colimado paralelo, ϕ_i , que perde intensidade por absorção e espalhamento, à medida que este atravessa o ambiente, aumentando a profundidade, r . Assim, supondo que o fluxo radiante resultante continue a percorrer o meio paralelamente a ϕ_t , a atenuação e o coeficiente de atenuação podem ser expressos da seguinte forma (Equação 7):

$$C = -\frac{\phi_t}{\phi_i} \Rightarrow \frac{\phi_t}{\phi_i} = e^{-cr} \Rightarrow \ln \frac{\phi_t}{\phi_i} = -cr \Rightarrow \phi_t = \phi_i e^{-cr} \Rightarrow c = \frac{1}{r} \ln \frac{\phi_i}{\phi_t}, \quad (7)$$

A Equação 7 indica que o fluxo radiante diminui exponencialmente conforme a profundidade aumenta. A Figura 5 ilustra o decaimento da irradiância de subsuperfície em porcentagem de acordo com o aumento da profundidade, para comprimento de onda do amarelo esverdeado (538 nm), em um corpo de água doce.

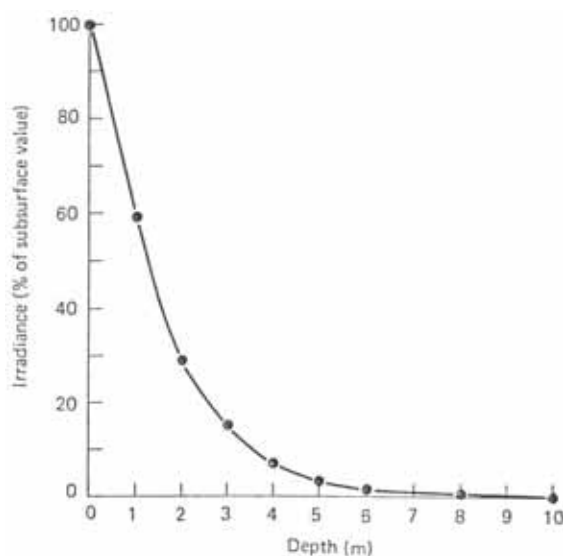


Figura 5 – Decréscimo exponencial da irradiância descendente (KIRK, 1994)

O coeficiente de absorção de um determinado meio, em um dado comprimento de onda, é obtido pela soma dos coeficientes de absorção individuais de cada um dos componentes do ambiente aquático, como a própria água, substâncias húmicas e *tripton*. O *tripton* é constituído por detritos e material revolvido do fundo, suspenso na coluna d'água (DEKKER, 1993). O espalhamento também pode ser expresso segundo a concentração dos componentes presentes na água, uma vez que é o processo pelo qual os fótons mudam de direção a partir de interações com a matéria.

Segundo Dekker (1993), existem dois tipos de espalhamento espectral: espalhamento por flutuação de densidade e espalhamento por partículas. O espalhamento por flutuação de densidade, causado por moléculas e similar ao espalhamento *Rayleigh* que ocorrem com os gases, é responsável pela coloração azul da água pura. O espalhamento por partículas ocorre nos casos em que as partículas são maiores do que alguns comprimentos de onda da luz. O sentido do espalhamento depende do tamanho da partícula ou molécula em relação ao comprimento de onda. Gregory (2006) mostra um diagrama com os intervalos dos tamanhos das partículas mais comumente detectadas em corpos d'água naturais (Figura 6).

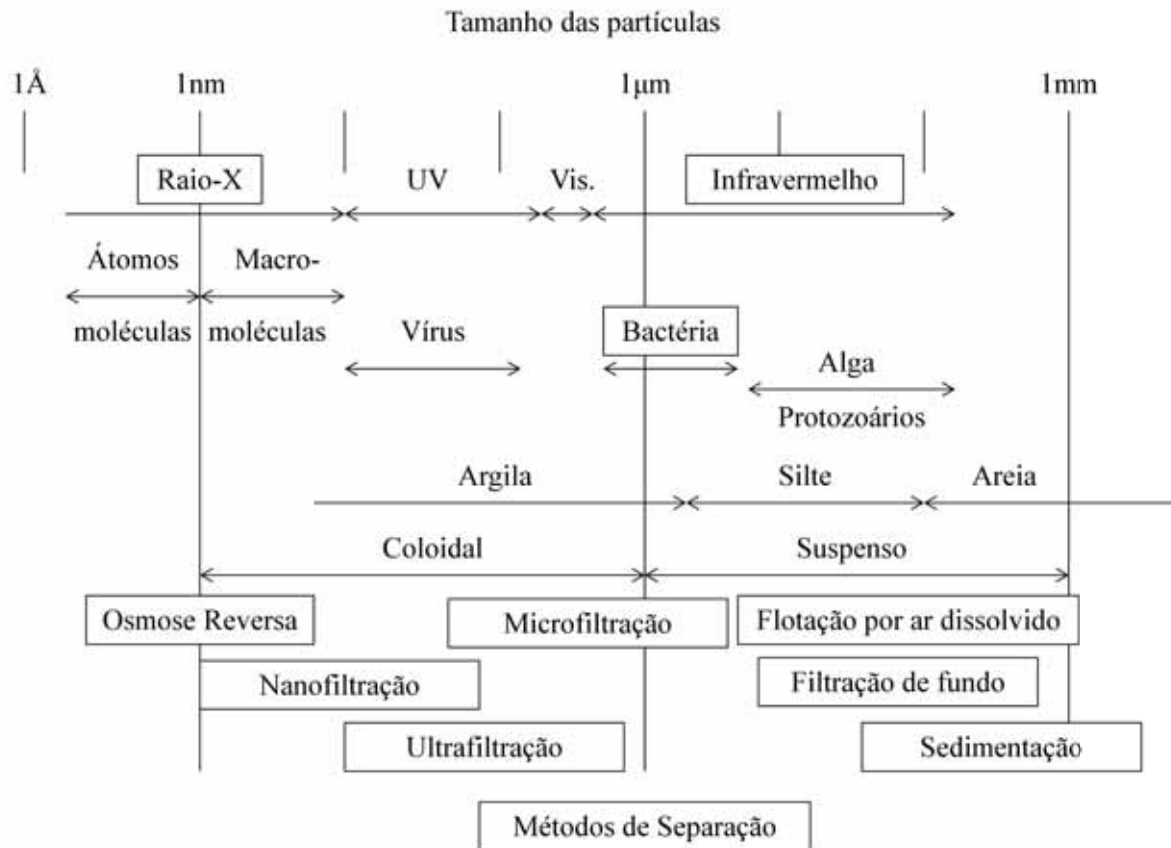


Figura 6 – Dimensão dos componentes presentes em águas naturais. Adaptado de Gregory (2006).

Frequentemente, o espalhamento é distinguido segundo a sua direção: frontal ou retro. Assim, o coeficiente de espalhamento é dado pela soma do coeficiente de espalhamento frontal e do coeficiente de retroespalhamento, sendo este último o responsável pelo retorno da energia radiante para fora d'água. O coeficiente de retroespalhamento é muito importante do ponto de vista do Sensoriamento Remoto da água, uma vez que a luz retroespalhada pelas moléculas de água e partículas que compõe as águas naturais torna possível obter informação sobre as propriedades abaixo da superfície da água (KUSTER, 2009).

Outra propriedade óptica inerente importante, segundo Kirk (1994) e Mobley (1994), está relacionada com a distribuição do fluxo espalhado, em que $\beta(\psi; \lambda)$ representa a fração de fluxo incidente espalhado de um feixe de luz através de um ângulo ψ , em um ângulo sólido $\Delta\Omega$ centrado em ψ . A Equação 8 mostra o espalhamento angular por unidade de distância e unidade de ângulo sólido, $\beta(\psi; \lambda)$, conhecido como função de espalhamento volumétrico espectral.

$$\beta(\psi; \lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{B(\psi; \lambda)}{\Delta r \Delta\Omega} = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Phi_s(\psi; \lambda)}{\Phi_i(\lambda) \Delta r \Delta\Omega} \quad [m^{-1} sr^{-1}] \quad (8)$$

Segundo Mobley (1994), o fluxo espectral espalhado em um determinado ângulo sólido $\Delta\Omega$ é o produto da intensidade radiante espalhada (I_s) na direção ψ e do ângulo sólido: $\Phi_s(\psi; \lambda) = I_s(\psi; \lambda)\Delta\Omega$. Além disso, dado que o fluxo incidente $\Phi_i(\lambda)$ incide sobre uma área ΔA , então a irradiância incidente correspondente é $E_i(\lambda) = \Phi_i(\lambda)/\Delta A$. Sendo $\Delta V = \Delta r \Delta A$ o volume da água que recebe a luz incidida, tem-se (Equação 9):

$$\beta(\psi; \lambda) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{I_s(\psi; \lambda)}{E_i(\lambda)\Delta V} \quad (9)$$

Fisicamente, a função de espalhamento volumétrico $\beta(\psi; \lambda)$ é definida como a intensidade espalhada por unidade de irradiância incidente por unidade de volume da água ou, ainda, como o diferencial da seção transversal do espalhamento por unidade de volume (MOBLEY, 1994).

De modo geral, segundo Bukata *et al.* (1995), o comportamento óptico da água é consequência de características que são inerentes aos próprios corpos d'água. Tais propriedades ópticas inerentes determinam os impactos para o campo de radiação da superfície que se manifestam como as propriedades ópticas aparentes que são mensuráveis.

2.2.2.2 Propriedades ópticas aparentes

A penetração da radiação solar na água, o decréscimo da energia radiante com o aumento da profundidade da coluna d'água, as mudanças da distribuição espacial do campo de luz subaquático (Figura 7) e a existência do feixe de luz ascendente com fótons cruzando a interface ar/água para a atmosfera são retratados por coeficientes apropriados que compõe a classe das propriedades ópticas aparentes (MOREL e BRICAUD, 1986).

As propriedades ópticas aparentes se manifestam sobre as grandezas radiométricas para descrever o campo de luz em um corpo d'água (MOBLEY, 1994). As propriedades são dependentes tanto das propriedades ópticas inerentes quanto do campo de luz ambiente (DEKKER, 1993; KIRK, 1994; MOBLEY, 1994). Algumas grandezas radiométricas como a irradiância satisfazem somente a primeira parte das condições que definem essas propriedades. A segunda condição requer que a grandeza exiba feições regulares suficientes e estabilidade para ser útil para descrever o corpo d'água. A irradiância pode mudar drasticamente de magnitude em poucos segundos se uma nuvem passar na frente do sol, por exemplo, ou se uma rajada de vento mudar a superfície da água de lisa para ondulada. Uma

propriedade óptica aparente ideal muda apenas levemente devido a alterações externas do ambiente (MOBLEY, 1994).

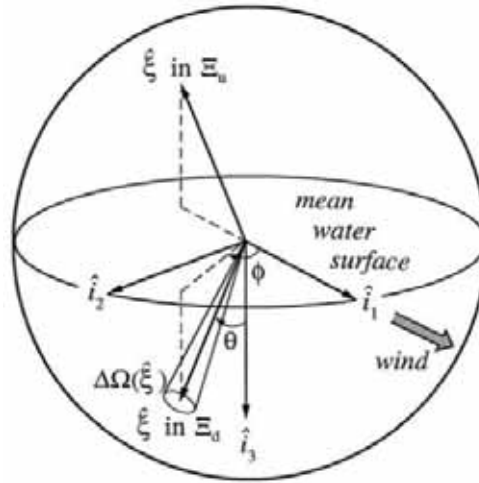


Figura 7 – Representação da geometria do campo de luz (MOBLEY, 1994)

Dentre as propriedades ópticas aparentes comumente utilizadas em Sensoriamento Remoto de ambientes aquáticos, segundo Mobley (1994), destacam-se a reflectância de irradiância espectral (também chamado de razão de irradiância), $R(z;\lambda)$, e a reflectância de Sensoriamento Remoto, $R_{sr}(\theta, \phi; \lambda)$. A primeira delas é definida como a razão entre as irradiâncias do espectro ascendente e descendente (Equação 10), sendo, em geral, avaliada logo abaixo da superfície d'água, onde a profundidade é quase zero.

$$R(z; \lambda) \equiv \frac{E_u(z; \lambda)}{E_d(z; \lambda)}. \quad (10)$$

A reflectância de Sensoriamento Remoto, R_{sr} , é mensurada acima da superfície da água, sendo expressa como mostra a Equação 11.

$$R_{sr}(\theta, \phi; \lambda) = \frac{L(z = a; \theta, \phi; \lambda)}{E_d(z = a; \lambda)}. \quad (11)$$

A profundidade $z = a$ indica que a reflectância de Sensoriamento Remoto é avaliada usando L e E_d medidas no ar, logo acima da superfície d'água, em que L é a radiância deixando a água. Esta propriedade indica quanto da luz descendente incidente, na direção da superfície d'água, é, eventualmente, retornada através da superfície na direção (θ, ϕ) , podendo este ser medido por um radiômetro apontada no sentido oposto (MOBLEY, 1994).

Segundo Mobley (1994), a radiância e a irradiância decrescem quase que exponencialmente, conforme a profundidade aumenta. Essa dependência pode ser explicada pelos coeficientes de atenuação difusa vertical. A Equação 12 mostra o decréscimo da irradiância em relação ao coeficiente de atenuação da irradiância descendente.

$$E_d(z; \lambda) = E_d(0; \lambda) \exp \int_0^z K_d(z'; \lambda) dz', \quad (12)$$

onde $K_d(z; \lambda)$ é o coeficiente de atenuação difusa espectral para a irradiância plana descendente espectral, dado por (Equação 13):

$$K_d(z; \lambda) = -\frac{d \ln E_d(z; \lambda)}{dz} = -\frac{1}{E_d(z; \lambda)} \frac{dE_d(z; \lambda)}{dz} \quad (m^{-1}). \quad (13)$$

Dessa forma, a variação da irradiância pode ser escrita como (Equação 14):

$$E_d(z; \lambda) \equiv E_d(0; \lambda) \exp[-\bar{K}_d(z; \lambda)] \quad (14)$$

A Tabela 2 mostra os demais coeficientes de atenuação difusa ou “K-funções”. Esses coeficientes são conceitualmente diferentes, porém, na prática, muitas vezes eles apresentam quase os mesmos valores numéricos, exceto, talvez, perto da superfície e todos eles assintoticamente aproximam-se do mesmo valor em grandes profundidades.

Tabela 2 – Coeficientes de atenuação difusa vertical

AOP's	Unidade de medida (SI)	Símbolo
Coeficientes (K-funções):		
de irradiância $L(z; \theta; \varphi)$	m^{-1}	$K(\theta; \varphi)$
de irradiância descendente $E_d(z)$	m^{-1}	K_d
de irradiância ascendente $E_u(z)$	m^{-1}	K_u
de irradiância escalar descendente $E_{od}(z)$	m^{-1}	K_{od}
de irradiância escalar ascendente $E_{ou}(z)$	m^{-1}	K_{ou}
de irradiância escalar total $E_o(z)$	m^{-1}	K_o
de PAR(z)	m^{-1}	K_{PAR}

Fonte: Adaptado de Mobley, 1994.

Segundo Dekker (1993), as medidas da atenuação difusa da radiação fotossinteticamente ativa, K_{PAR} (400 – 700 nm), tornou-se um procedimento padrão na determinação das condições ópticas de lagos. Elas são úteis na quantificação da radiação

disponível aos fitoplânctons e às macrófitas submersas, bem como na estimação da transparência da água como padrão de uso para lazer, em estudos de produção primária e na indicação de turbidez.

2.2.2.3 Propriedades ópticas inerentes difusas

Em adição às propriedades ópticas inerentes e aparentes há um conjunto de propriedades intermediárias, chamadas de propriedades ópticas inerentes difusas. Elas descrevem a absorção e o espalhamento da irradiância descendente e ascendente dentro do ambiente aquático, em relação ao ângulo da radiação incidente que penetra na coluna d'água.

Para melhor compreender as orientações das propriedades ópticas inerentes difusas, a Figura 8 ilustra o comportamento de algumas dessas propriedades e de algumas variáveis radiométricas.

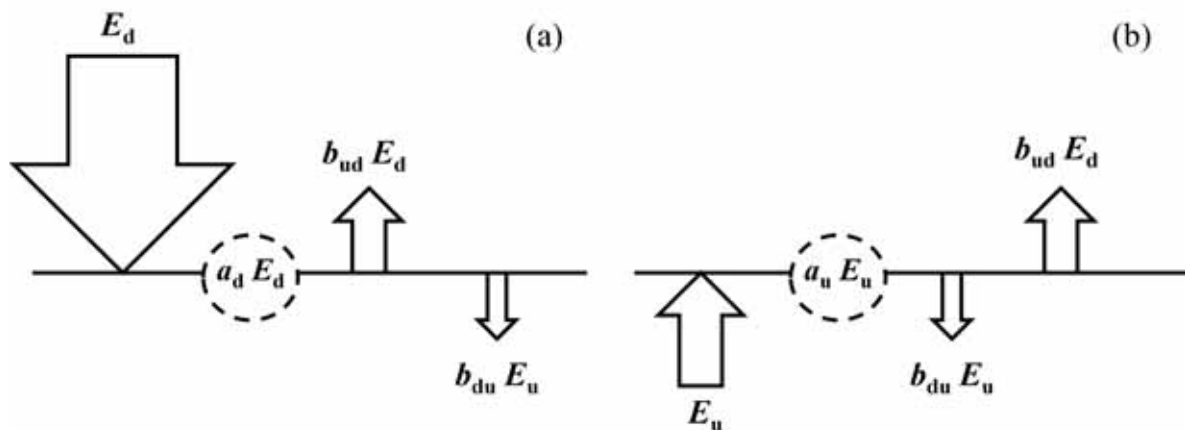


Figura 8 – Mudanças na (a) irradiância descendente e (b) ascendente em termos de função de espalhamento e absorção. Adaptado de Dekker *et al.*, 2002

A maior parte dessas propriedades é apenas usada, por conveniência matemática, na derivação de modelos analíticos, com exceção dos fatores de forma das funções de espalhamento descendente e ascendente (Tabela 5 e Figura 9) que não são parâmetros intermediários, permanecendo presente ao final dos modelos analíticos.

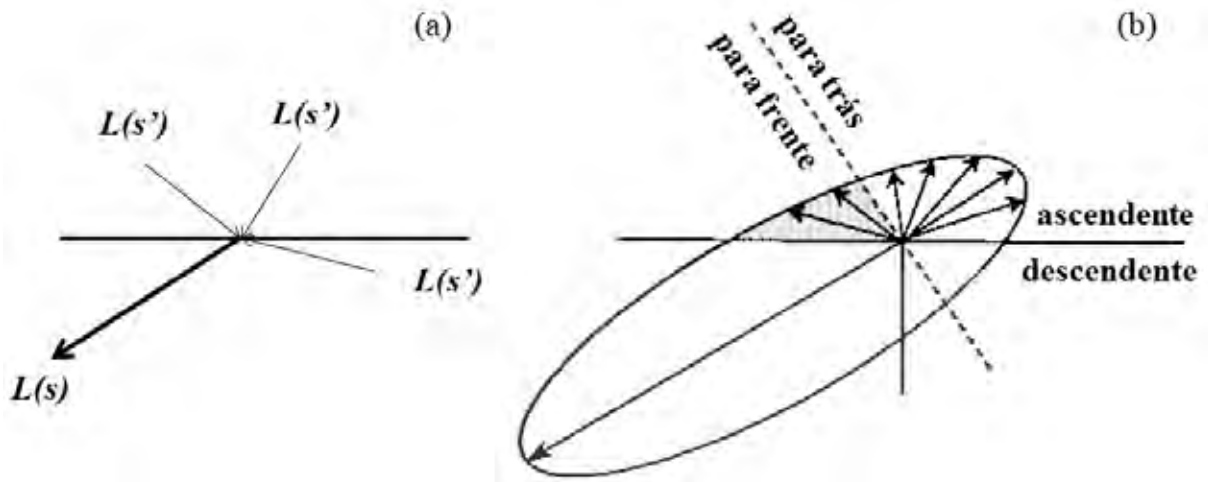


Figura 9 – (a) Contribuição da radiância de outras direções. (b) Fator de forma. Adaptado de Dekker *et al.*, 2002

A Figura 9a mostra a fração da radiância incidente $L(s')$ que é espalhada na direção s e contribui para $L(s)$, que é dado por $\tilde{\beta}(s, s')$, onde o ângulo entre os vetores s' e s corresponde ao ângulo de espalhamento, ψ . O fator de forma do espalhamento descendente, ilustrado na Figura 9b, indica a diferença do espalhamento frontal e descendente (área formada destacada em cinza), ou seja, quanto do espalhamento frontal contribui para o que sai da coluna d'água. Do mesmo modo, o fator de forma do espalhamento ascendente (Figura 9b) indica quanto do retroespalhamento ascendente não sai para a atmosfera.

Os fatores de forma convertem o coeficiente de retroespalhamento em funções de espalhamento ascendente e descendente. A Figura 9 explica como os fótons espalhados ascendentemente são originados, parcialmente, de fótons que foram espalhados frontalmente. Uma vez que a maioria das partículas na água espalha mais a luz na direção frontal do que para trás, essa contribuição pode ser bem significativa sobre a radiação mensurada em Sensoriamento Remoto (STAVN e WEIDMANN, 1989).

2.2.3 Teoria da transferência radiativa

A atenuação da radiação ao longo da coluna d'água interfere diretamente na radiância disponível que é registrada por sistemas sensores, seja em nível orbital, aerotransportado ou de campo. Dessa forma, neste item é apresentada uma parte da teoria da transferência radiativa, segundo Kirk (1994), que explica a influência do campo de luz e as propriedades ópticas inerentes na variação da radiância em diferentes profundidades do meio aquático.

Dado um determinado campo de luz incidente, as características geométricas da luz subaquática são, exclusivamente, determinadas pelas propriedades do meio, expressando a estrutura do campo de luz em termos de propriedades ópticas inerentes do corpo d'água. No entanto, as relações analíticas que as abrangem ainda não foram derivadas devido à complexidade da função de espalhamento volumétrico em águas naturais (KIRK, 1994).

Uma alternativa de relacionar as propriedades do campo de luz e as propriedades ópticas do meio é utilizando o coeficiente de absorção para o cosseno médio e o coeficiente de atenuação vertical relacionado à irradiância descendente. Além disso, foram derivadas relações entre certas propriedades do campo de luz e as propriedades ópticas difusas. Essas várias relações são obtidas através do uso da equação de transferência da radiância, que descreve como a radiância varia com a distância ao longo de qualquer trajetória definida em um ponto especificado no meio aquático (KIRK, 1994).

Segundo Kirk (1994), a variação da radiância na coluna d'água pode ser representada pela Equação 15, dado que o corpo d'água apresente as mesmas propriedades ópticas ao longo de uma dada profundidade, com uma entrada constante de radiação não polarizada monocromática na superfície e ignorando a emissão fluorescente dentro da água.

$$\frac{dL(z, \theta, \phi)}{dr} = -c(z)L(z, \theta, \phi) + L^*(z, \theta, \phi). \quad (15)$$

O termo à esquerda representa a taxa de atenuação da radiância em relação a um diferencial de espessura da coluna d'água, r , ao longo da trajetória definida pelos ângulos zenital e azimutal, θ e ϕ , na profundidade z . Ao analisar o termo da direita, verifica-se que a taxa líquida de mudança da radiância é a resultante de dois processos opostos: perda por atenuação ao longo da coluna, sendo $c(z)$ o valor do coeficiente de atenuação da luz na profundidade z , e L o ganho por espalhamento da luz, que viajava na direção (θ', ϕ') e mudou para a direção (θ, ϕ) . O último termo (à direita) é determinado pela função de espalhamento volumétrico do meio na profundidade z – em que $\beta(z, \theta, \phi; \theta', \phi')$ indica que o ângulo de espalhamento é o ângulo entre as direções (θ, ϕ) e (θ', ϕ') – e pela distribuição da radiância, $L(z, \theta', \phi')$.

Em cada elemento da irradiância incidente, $L(z, \theta', \phi')d\omega(\theta', \phi')$ – onde $d\omega(\theta', \phi')$ é um elemento de ângulo sólido formando um cone infinitesimal contendo a direção (θ', ϕ') –, no elemento volume ao longo de dr é acrescentada alguma radiância espalhada na direção (θ, ϕ) (KIRK, 1994). A partir da integração de ambos os termos da

Equação 15 para todos os ângulos, chega-se a seguinte relação (Equação 16), em que o decréscimo da irradiância incidente (E_0) é função da absorção, em um diferencial de profundidade, z :

$$\frac{d\vec{E}}{dz} = -c(\lambda)E_0 + b(\lambda)E_0 = -a(\lambda)E_0. \quad (16)$$

A Figura 10 esquematiza os processos subjacentes da equação de transferência radiativa, em que o feixe de luz atravessa uma distância, dr , do meio aquático, na direção (θ, ϕ) , onde são perdidos alguns fótons por espalhamento e alguns por absorção ao longo da trajetória da luz, mas também adquire novos fótons da luz que inicialmente viajam em outras direções (θ', ϕ') e passam para direção (θ, ϕ) .

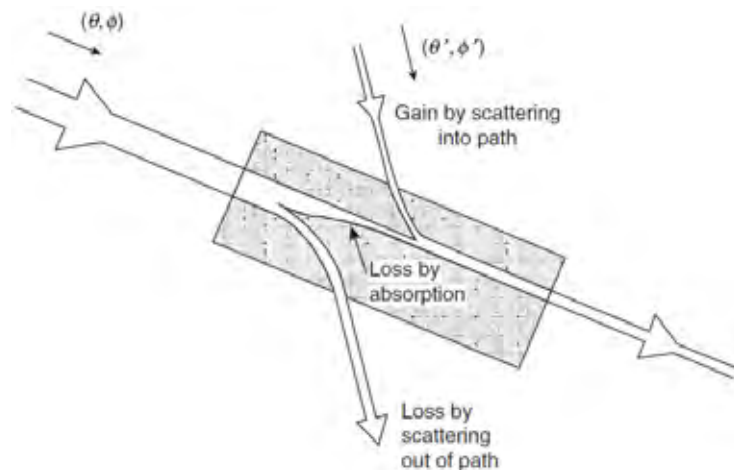


Figura 10 – Processo de transferência radiativa (KIRK, 1994)

2.2.4 Águas opticamente rasas

As águas opticamente rasas são um caso especial em Sensoriamento Remoto de sistemas aquáticos. Envolve a mensuração de sinais do substrato ao longo da coluna d'água e na interface ar/água. Este conceito é aplicado, principalmente, em estudos que visam o mapeamento do substrato (DEKKER *et al.*, 2002).

Maritorena *et al.* (1994) desenvolveram uma formulação explicando os processos ópticos que ocorrem em corpos d'água rasos, a partir da derivada da fórmula analítica, baseado em um conjunto de hipóteses simplificadas que expressa a reflectância de águas rasas como uma função da profundidade da observação, da profundidade do fundo e do albedo.

Essa fórmula envolve duas propriedades ópticas aparentes do corpo d'água: o coeficiente de atenuação difusa médio e a reflectância que seria observada se o fundo fosse infinitamente profundo.

Segundo Maritorena *et al.*, 1994, em águas opticamente rasas, a irradiância ascendente logo abaixo da superfície, $E_u(0)$, resulta da soma entre o fluxo retroespalhado pela coluna d'água (como se o fundo fosse um corpo negro, ou seja, absorvesse toda a energia) e o fluxo refletido pelo fundo (quando este não é negro) e, então, transmitido através da coluna, como mostra a Equação 17.

$$E_u(0) = [E_u(0)]_C + [E_u(0)]_B, \quad (17)$$

onde C e B referem-se, respectivamente, à coluna d'água e ao fundo. O primeiro termo corresponde aos fótons que não interagem com o fundo, enquanto aqueles que interagem com o substrato imerso, ao menos uma vez, formam o segundo termo.

O primeiro termo pode ser estimado em termos de b_{bd} , o coeficiente de retroespalhamento (ou função de reflectância) para o raio de luz descendente, em z , e da irradiância descendente, definida como $E_d(z)$, considerando um diferencial de espessura, dz .

Sendo fixado o comprimento de onda, $E_d(z)$ pode ser expresso pela Equação 14. No entanto, antes de atingir a superfície, $dE_u(z)$ é atenuado ao longo da trajetória de z até atingir a superfície, representado por $\exp(-kz)$ (MARITORENA *et al.*, 1994), onde k é o coeficiente de atenuação vertical para o fluxo ascendente, definido por Kirk (1989). Assim, a contribuição da camada considerada para a irradiância logo abaixo da superfície é denotada por $dE_u(z \rightarrow 0)$, sendo expresso pela Equação 18.

$$dE_u(z \rightarrow 0) = b_{bd}E_d(0)\exp[-(K_d + k)z]dz. \quad (18)$$

Essa teoria consiste que b_{bd} , K_d , e k não dependem da profundidade, e considerando a hipótese de que todas as camadas, entre z e 0 , contribuem para formação de $E_u(0,z)$, pode-se integrar nesse intervalo, obtendo-se a Equação 19 (MARITORENA *et al.*, 1994).

$$E_u(0,z) = (K_d + k)^{-1}b_{bd}E_d(0)\{1 - \exp[-(K_d + k)z]\} \quad (19)$$

Para um corpo d'água de profundidade infinita ($z = \infty$), e $(K_d + k)^{-1}b_{bd}$ podendo ser representado por R_∞ , que é a reflectância em profundidade nula, dado que essa coluna passa a ser limitada pela presença de um fundo (que absorve perfeitamente) a uma profundidade H , a Equação 19 pode ser modificada para Equação 20, obtendo-se, então, o primeiro termo da Equação 17.

$$E_u(0, H) = R_\infty E_d(0) \{1 - \exp[-K_d + k]H\} = [E_u(0)]_c. \quad (20)$$

Se o fundo for um refletor lambertiano com um albedo A , o fluxo refletido pelo fundo, no nível H , ou seja, imediatamente acima do fundo, é (Equação 21):

$$[E_u(H)]_B = AE_d(H) = AE_d(0) \exp(-K_d H). \quad (21)$$

Segundo Maritorena *et al.* (1994), esta contribuição do fundo para a irradiância ascendente será atenuada de H até a superfície. Supondo que este fluxo ascendente é atenuado com o mesmo k , a contribuição do fundo para a irradiância ascendente que alcança a superfície pode ser expressa pela Equação 22.

$$[E_u(0)]_B = AE_d(0) \exp[(-K_d + k)H]. \quad (22)$$

Através da adição das Equações 20 e 22 obtém-se a Equação 19 que pode ser representado pela Equação 23.

$$E_u(0) = E_d(0) \{R_\infty \{1 - \exp[-(K_d + k)H]\} + A \exp[-(K_d + k)H]\}. \quad (23)$$

Quando a Equação 23 é dividida pela irradiância incidente $E_d(0)$, essa passa a ser expressa em termos de razão entre irradiâncias. Devido à presença agora de dois raios de luz ascendentes, um do fundo e outro da coluna d'água, k pode ser descrito como k_B e k_C , respectivamente, pois os raios de luz não apresentam a mesma estrutura geométrica, sendo, então, atenuados em caminhos diferentes (MARITORENA *et al.*, 1994). Assim, a equação 23 pode ser escrita como (Equação 24)

$$R(0, H) = R_\infty + \exp(-K_d H) [A \exp(-k_B H) - R_\infty \exp(-k_C H)]. \quad (24)$$

Essas propriedades ópticas são de grande importância em aplicações do Sensoriamento Remoto em ambientes aquáticos, como no mapeamento de macrófitas submersas, de grama do mar e macro algas, recifes de corais, areia, seixos de corais, lama de fundo, organismos bentônicos e micro algas (DEKKER *et al.*, 2002).

2.3. VEGETAÇÃO AQUÁTICA SUBMERSA

A vegetação aquática submersa é um importante componente dos ecossistemas aquáticos, uma vez que contribui para a elevação da estrutura e diversidade de *habitats*; interferem no ciclo de nutrientes e participam da base da cadeia alimentar (ESTEVES, 1998; WETZEL, 2001). As macrófitas aquáticas fornecem, em geral, um *habitat* importante tanto em ambientes marinhos ou de água doce, desempenhando um papel importante como fonte de alimento para os animais, desde zooplânctons, peixes até aves aquáticas. Além disso, essas plantas servem como refúgio ou abrigo, fornecendo camas, berçário para outras comunidades de plantas e animais, bem como ajudando a estabilizar margens, dificultando a erosão (DEKKER *et al.*, 2002).

Segundo Wetzel (2001), as macrófitas aquáticas podem ser classificadas em dois grandes grupos: macrófitas aquáticas enraizadas ao substrato e macrófitas flutuantes livres. Entre as plantas aquáticas enraizadas há: emersas, de folhas flutuantes e submersas. Quanto às não enraizadas, encontram-se as de folhas flutuantes livres e submersas livres. A Figura 11 ilustra os diferentes tipos de plantas aquáticas existentes.

Apesar do importante papel das macrófitas aquáticas na dinâmica de ecossistemas aquáticos, essas podem formar densas e extensas colonizações em corpos d'água, onde o equilíbrio ecológico foi rompido (PITELLI *et al.*, 2008). A ocorrência de vegetação aquática em reservatórios de hidrelétricas causa um problema de grande importância ao setor energético, uma vez que a eficiência das usinas é comprometida, devido à elevada infestação por plantas aquáticas tanto emersas quanto imersas (CAVENAGHI *et al.*, 2003).

Segundo Thomaz (2006), em sistemas de reservatórios em cascata, as plantas aquáticas submersas são comumente encontradas, em grande densidade, nos últimos reservatórios, enquanto que nos primeiros predominam a colonização por espécies de macrófitas flutuantes livres. O padrão de distribuição das espécies de macrófitas, de acordo com Henry e Maricato (1996 apud THOMAZ, 2006), está fortemente relacionado com a disponibilidade de radiação subaquática na coluna d'água, ou seja, transparência da água,

maior nos últimos reservatórios, propiciando boas condições ao desenvolvimento de vegetação aquática submersa. Outro fator, diretamente associado, é a concentração de nutrientes na água, em especial de fósforo, maior nos primeiros reservatórios, dando condições ao desenvolvimento de espécies não enraizadas e fitoplânctons.

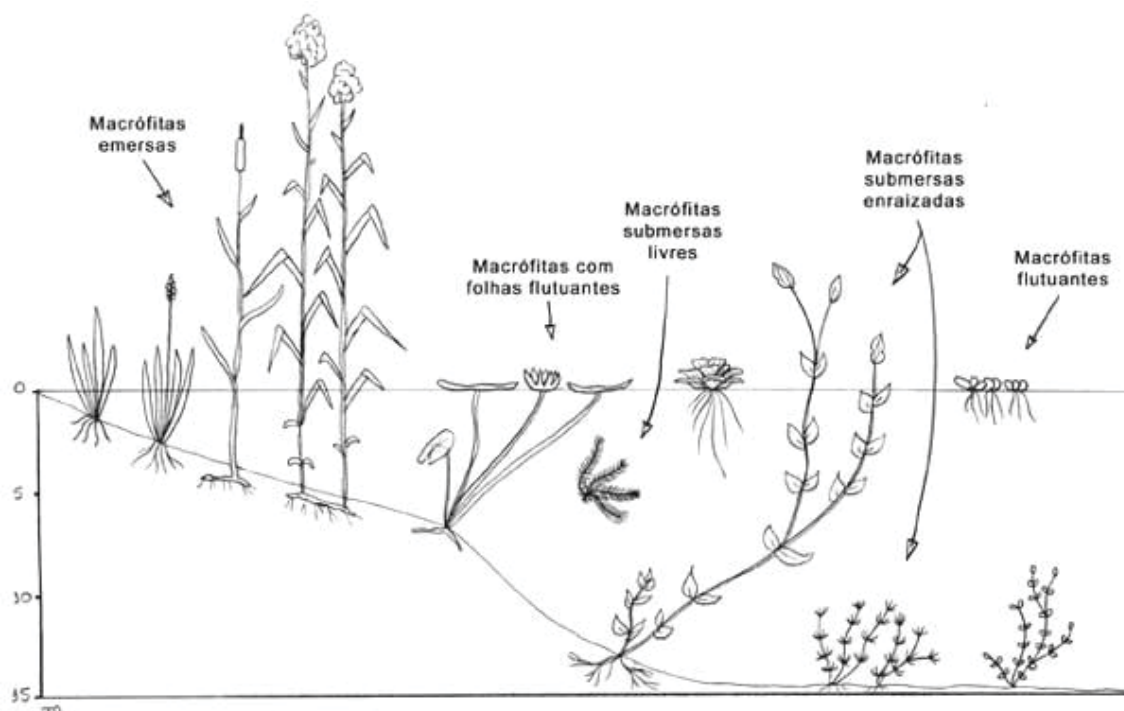


Figura 11 – Macrófitas aquáticas (ESTEVES, 1998)

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO DE MACRÓFITAS SUBMERSAS

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). Entre as principais plantas daninhas aquáticas destacam-se as macrófitas submersas. No entanto, sua posição abaixo da superfície d'água dificulta seu mapeamento e monitoramento utilizando imagens de Sensoriamento Remoto (ACKLESON e KLEMAS, 1987; HAN e RUNDQUIST, 2003; ANDREW e USTIN, 2008; HESTIR *et al.*, 2008). A resposta espectral das plantas aquáticas submersas é caracterizada como sendo uma mistura das assinaturas das macrófitas imersas com a assinatura da água e dos diversos materiais presentes na coluna d'água (HESTIR *et al.*, 2008)

Em águas abertas, a superfície absorve, praticamente, toda a radiação incidente dos comprimentos de onda da região do infravermelho próximo que, por outro lado, são fortemente refletidos pela vegetação verde e vários sedimentos. Entretanto, no espectro visível, as águas claras naturais são bem transparentes, permitindo que a radiação verde e amarela inclua informações em vários metros de profundidade ou até dezenas de metros, no caso de águas turbidas e limpas, respectivamente. Assim, a reflectância espectral das plantas aquáticas 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 como condições climáticas, iluminação do sol e ângulo de visada, que determinam a função de distribuição da reflectância bidirecional, comprometem o Sensoriamento Remoto da vegetação aquática submersa. Quando a luz do sol é especularmente refletida pela superfície d'água, é impedida a recuperação do sinal utilizável. A detecção espectral da vegetação aquática submersa também é afetada pelas propriedades ópticas aparentes da água, como a reflectância de superfície e a atenuação difusa vertical, e de propriedades ópticas inerentes que não dependem da distribuição da radiância ambiente na coluna d'água (HESTIR *et al.*, 2008).

Peñuelas *et al.* (1993) mostram espectros representativos de várias espécies de plantas aquáticas, tanto emersas quanto submersas (Figura 12). As plantas imersas e algas apresentam espectros claramente distinguíveis das plantas emersas, devido a sua menor reflectância, especialmente no infravermelho, que é absorvido pela água.

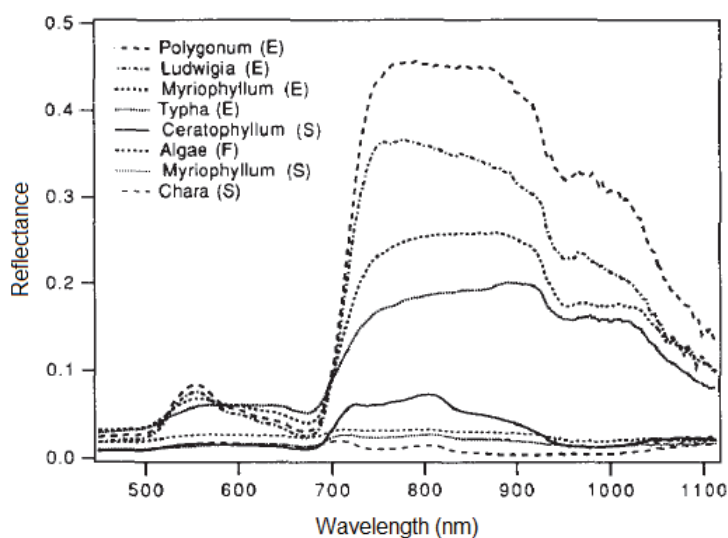


Figura 12 – Curvas de reflectância de plantas aquáticas (PEÑUELAS *et al.*, 1993)

O espectro de reflectância da *Chara sp.* (macrófita imersa) se destaca por ser muito baixo devido à combinação entre a absorção da radiação pela água e a estrutura e baixa

densidade, se aproximando da curva de fundo do corpo d'água. A *Ceratophyllum* e o *Myriophyllum*, plantas aquáticas submersas, também apresentam baixa reflectância, entretanto, maiores em relação ao apresentado pela *Chara sp.* (PEÑUELAS *et al.*, 1993).

A curva espectral típica da vegetação aquática submersa pode ser observada na Figura 13, em duas condições: fora da água e logo abaixo da superfície. Em ambas as curvas são detectadas maiores valores de reflectância após 700 nm (infravermelho próximo) em relação ao espectro visível, e duas bandas de absorção de baixa intensidade: uma na região do azul (entre 400 – 500 nm) e outra, na região do vermelho (aproximadamente em 675 nm). Apesar das plantas aquáticas submersas apresentarem curvas espectrais características das espécies vegetais terrestres comuns, o que as diferem, basicamente, são os menores valores de reflectância apresentados pelas primeiras. A água também apresenta uma maior reflectância nos comprimentos de onda do azul e do vermelho, característica associada à umidade da planta no momento da tomada dos dados (HAN e RUNDQUIST, 2003).

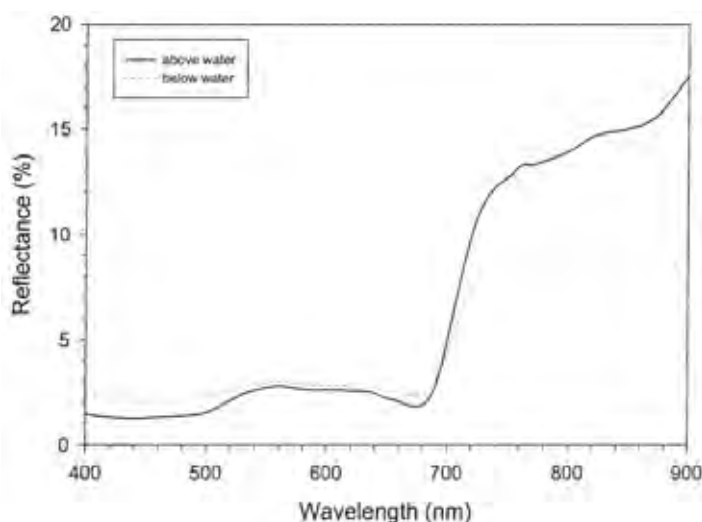


Figura 13 – Assinatura espectral da *Ceratophyllum demersum* acima e abaixo da superfície da água (HAN e RUNDQUIST, 2003)

Han e Rundquist (2003) realizaram estudos sobre o comportamento espectral da vegetação aquática submersa em tanques experimentais, em condições de águas claras e águas com clorofila algal (Figura 14). Os resultados obtidos pelos autores indicam que a reflectância decresce, entre os comprimentos de onda de 700 – 900 nm, à medida que a altura da coluna d'água sobre a macrófita submersa (distância entre a superfície da água até o dossel da planta aquática submersa) aumenta tanto para a água com e sem clorofila algal, devido à absorção da luz pela água, agora com maior volume.

O pico na luz verde associado à clorofila algal, por outro lado, aumenta à medida que a macrófita se distancia da superfície da água. Esta característica é atribuída ao aumento

da reflectância volumétrica proporcionada pela clorofila algal, levando ao decréscimo da reflectância da macrófita submersa. Assim, quanto menor a altura da coluna d'água sobre o dossel da planta observa-se uma maior reflectância na região do infravermelho próximo. Devido à absorção da radiação pela água, o típico platô no infravermelho próximo da vegetação é modificado, surgindo dois picos: um entre 701 – 722 nm e outro próximo a 815 nm (HAN e RUNDQUIST, 2003).

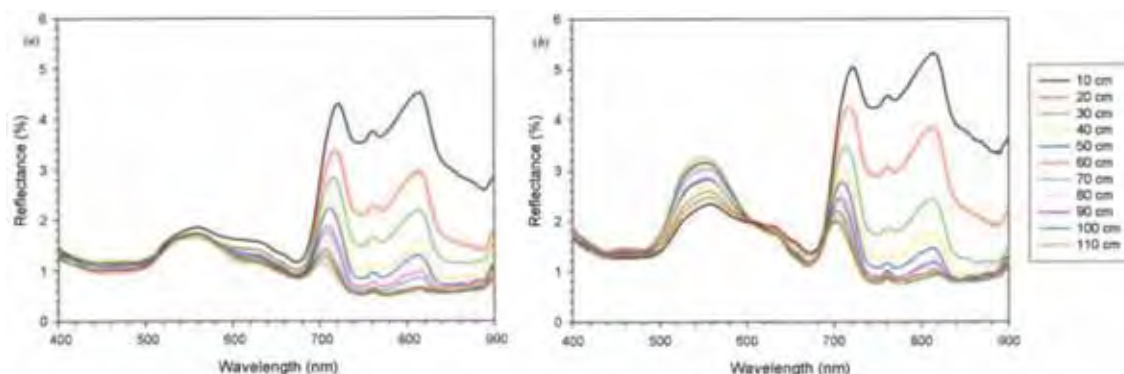


Figura 14 – Curvas de reflectância da *Ceratophyllum demersum* com diferentes alturas de coluna d'água sobre o dossel (a) sem e (b) com algas (HAN e RUNDQUIST, 2003)

Tanto para águas sem ou com clorofila algal, ocorre um deslocamento do pico no infravermelho próximo, de 722 nm para 702 nm, conforme a altura da coluna d'água sobre o dossel da macrófita submersa aumenta de 10 – 110 cm. Esta característica está relacionada, provavelmente, ao aumento da absorção nos maiores comprimentos de onda do infravermelho próximo pela água, responsável pelo pico de refletividade mover-se para comprimentos de onda menores (HAN e RUNDQUIST, 2003).

HAN (2002) também realizou experimentos com plantas aquáticas submersas, mensurando a reflectância em diferentes alturas de coluna d'água sobre o dossel, variando de 0,61 m a 7 m. Nesse trabalho foi verificado, assim como no estudo realizado por Han e Rundquist (2003), uma menor contribuição da resposta espectral da macrófita submersa devido à atenuação causada pelo aumento da altura de coluna d'água sobre seu dossel. O autor identificou três picos de reflectância relacionados com a ocorrência da planta em 560, 710 e 800 nm. A reflectância mínima em 680 indica a absorção da clorofila da planta.

Além da altura de coluna d'água sobre o dossel, as respostas espectrais das macrófitas imersas, segundo Yuan e Zhang (2008), são também dependentes da cobertura da planta. A Figura 15 mostra curvas espectrais de diferentes coberturas de plantas aquáticas submersas. Para os maiores percentuais de cobertura da vegetação há um leve aumento do pico de reflectância em torno de 550 nm e um grande aumento após 700 nm, em comparação

ao espectro visível. Observa-se, também, uma baixa reflectância no intervalo que compreende a luz azul (400 – 500 nm) e na região do vermelho (675 nm), a partir de uma cobertura de 20%.

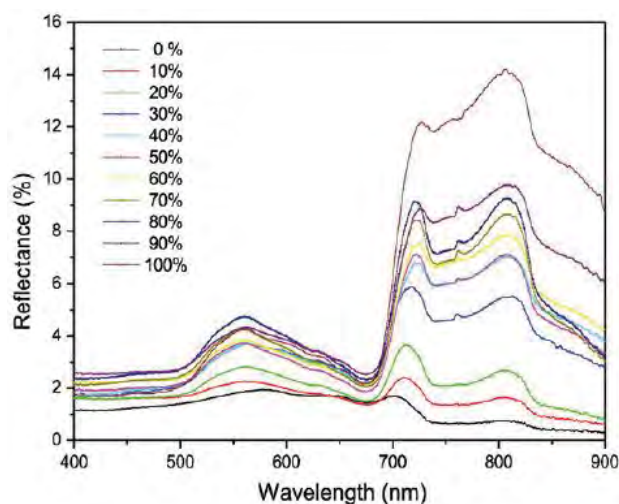


Figura 15 – Curvas de reflectância de macrófitas submersas com diferentes níveis de cobertura do dossel (YUAN e ZHANG, 2008)

2.5 ANÁLISE MULTIVARIADA

Quando se trabalha com um grande número de dados e variáveis, é apropriada a aplicação de técnicas de análise quantitativa que ajudem a diminuir a quantidade de atributos, de modo a facilitar a aplicação de métodos de inferência posteriores. A estatística multivariada possui tanto técnicas de análise exploratória que auxilia na sintetização da estrutura de variabilidade dos dados quanto de técnicas de inferência estatística.

A análise multivariada pode ser definida como sendo um conjunto de técnicas estatísticas utilizadas em situações as quais várias variáveis são medidas, simultaneamente, em cada elemento amostral (MINGOTI, 2005). Neste subitem serão abordadas as duas técnicas de análise multivariada aplicadas no presente trabalho: a análise de agrupamento e a análise de regressão.

2.5.1 Análise de Agrupamento

A análise de agrupamento ou *clustering* que tem o objetivo classificar em grupos os elementos de uma amostra ou população, segundo um grau de similaridade que exista entre

os elementos, em termos das variáveis medidas para cada um deles (MINGOTI, 2005), a partir de um método de hierarquização (KRZANOWSKI e MARRIOTT, 1995). Os métodos de análise de agrupamento tendem a organizar um conjunto de indivíduos, que apresentam determinadas características em comum, em grupos homogêneos. Os agrupamentos podem dar 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) como, por exemplo, a distância Euclidiana e a métrica de Canberra (JOHNSON e WICHERN, 2007). A escolha de uma medida de similaridade deve considerar fatores como a natureza das variáveis (discreto, contínuo, binário), escalas de medição (nominal, ordinal, razão), e conhecimento sobre o assunto analisado (JOHNSON e WICHERN, 2007). Para geração dos *clusters* são utilizados critérios de decisão baseado em métodos de agrupamento hierárquico, como as de ligação. Os três principais critérios de ligação são esquematizados na ilustração da Figura 16 (JOHNSON e WICHERN, 2007) e a Tabela 3 apresenta os respectivos algoritmos.

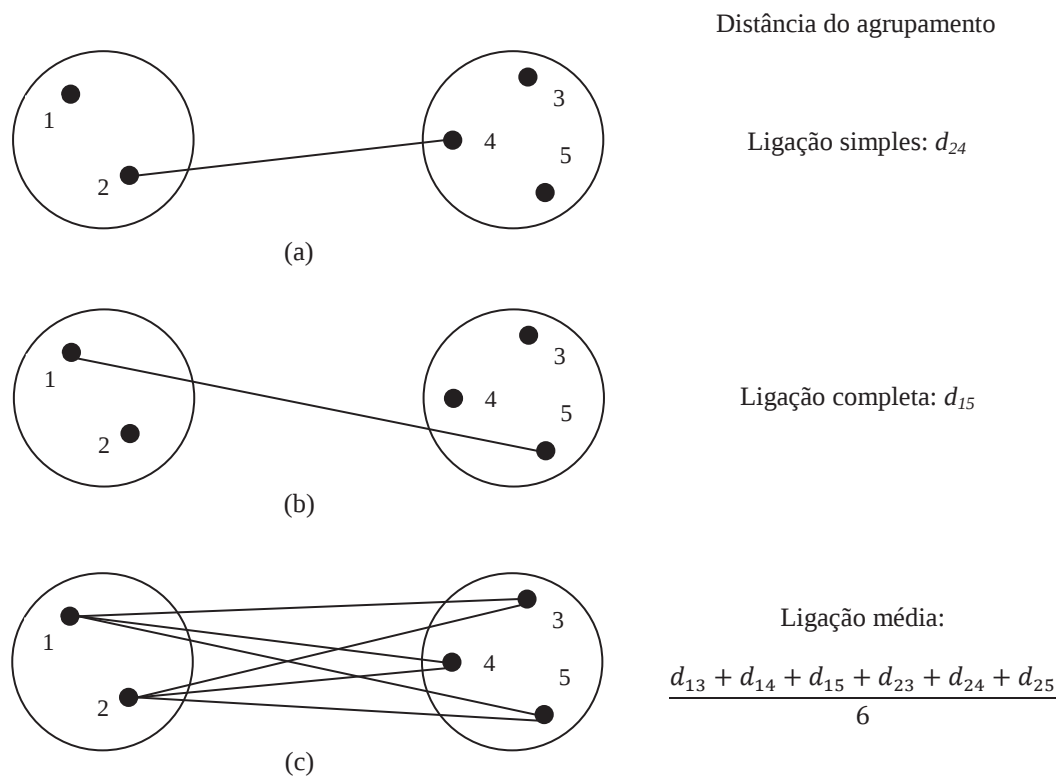


Figura 16 – Distância entre agrupamentos (dissimilaridade) por (a) ligação simples, (b) ligação completa e (c) ligação média (Adaptada de Johnson e Wichern, 2007)

Tabela 3 – Principais métodos hierárquicos de agrupamento

Método de hierárquico de agrupamento	Fórmula
Ligação simples ou vizinho mais próximo	$d_{(UV)W} = \min\{d_{UW}, d_{VW}\}$
Ligação completa ou vizinho mais distante	$d_{(UV)W} = \max\{d_{UW}, d_{VW}\}$
Ligação média	$d_{(UV)W} = \frac{\sum_i \sum_k d_{ik}}{N_{(UV)}N_W}$

As variáveis apresentadas na Tabela 3 correspondem a: d_{ik} é a distância entre um objeto i do agrupamento (UV) e o objeto k do cluster W da matriz de distâncias, em que U , V , e W representam os agrupamentos a serem gerados, e $N_{(UV)}$ e N_W é o número de itens no agrupamento (UV) e W .

2.5.2 Análise de regressão

Uma das técnicas de estatísticas multivariada mais empregada no processamento de dados de sensoriamento remoto é a análise de regressão (Rundquist *et al*, 1996; Arraut *et al*, 2005). A análise de regressão estuda as relações entre variáveis ajustando uma função matemática. A aplicação dessa técnica auxilia na sumarização de uma grande quantidade de dados (análise exploratória), bem como na previsão de resultados (inferência) (JOHNSON e WICHERN, 2007).

Em estudos de sistemas cujas variáveis mudam de quantidade, é de interesse examinar os efeitos que algumas variáveis exercem (ou parecem exercer) sobre as outras, podendo haver uma simples relação entre as variáveis. No entanto, na maioria dos processos físicos isto é uma exceção, não sendo uma regra. Muitas vezes, existe uma relação funcional que é muito complicado de entender ou descrever em termos simples. Nestes casos, a análise de regressão auxilia a ajustar um modelo aproximado ao verdadeiro que explique uma relação funcional a partir de alguma função matemática simples, como um polinômio, que contenha variáveis adequadas envolvidas (DRAPER e SMITH, 1998).

Um modelo de regressão linear clássico afirma que a variável dependente Y é composta por uma média, que depende de z_i 's variáveis explicativas e um erro radômico ε , que considera o erro das medidas e o efeito de outras variáveis não explicitadas no modelo. Dessa forma, um modelo de regressão linear com apenas uma resposta é explicada pela Equação 25.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \dots + \beta_r z_r + \varepsilon \quad (25)$$

onde z é o número de variáveis independentes. A partir disso, nota-se que o objetivo da análise de regressão é desenvolver uma equação que permita determinar o valor da variável resposta, dado os valores das variáveis explicativas. Uma técnica que permite ajustar esse modelo é a estimação por mínimos quadrados (JOHNSON e WICHERN, 2007).

Vários trabalhos relacionados à detecção de feições espectrais associados a algum componente opticamente ativo utilizam análise de regressão. Entre eles, podem ser citados Goodin *et al.* (1993) e Rundquist *et al.* (1996) que aplicaram análise de regressão para encontrar uma relação da primeira derivada da reflectância com a turbidez e a clorofila algal, respectivamente. Han (2002) e Han e Rundquist (2003) também ajustaram funções entre a altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa e os dados de reflectância de alguns comprimentos de onda específicos.

2.6 TRATAMENTO DE DADOS ESPECTRORRADIOMÉTRICOS

A partir do processamento dos dados espectrais coletados em campo é possível adquirir as curvas de diferentes grandezas como a reflectância, radiância e irradiância que permitem extrair informações sobre a natureza do alvo analisado. No entanto, essas curvas podem apresentar ruídos aleatórios, associados ao equipamento de coleta ou a pequenas variações de iluminação no momento da tomada das medidas, dificultando a análise dos dados, mas que podem ser removidas a partir de algumas técnicas matemáticas.

Além da identificação de feições espectrais das curvas de reflectância, associadas a determinados alvos, existem técnicas que auxiliam na extração de mais informações a respeito do objeto de interesse que podem estar sendo mascarados pela resposta de outro componente. Neste item, são apresentadas as técnicas mais comumente adotadas no tratamento dos dados espectrais utilizadas neste trabalho.

2.6.1 Remoção de ruído

Os dados originais de espectrorradiometria apresentam ruídos no sinal registrado, implicando em curvas com feições que não consistem em informação proveniente da radiação refletida ou emitida pelo alvo. Esse ruído deve ser eliminado para facilitar a análise da

assinatura espectral, bem como para impedir que interfira sobre o resultado de outros processamentos feitos sobre as curvas de reflectância.

A remoção do ruído pode ser realizada aplicando técnicas de suavização, como a filtragem por média móvel (TSAI e PHILPOT, 1998). Esse método consiste no cálculo da média aritmética de um conjunto de dados de reflectância vizinhos em relação a um determinado intervalo de comprimento de onda (Equação 26).

$$\hat{S}(\lambda_j) = \frac{\sum S(\lambda_i)}{n} \quad (26)$$

onde $\hat{S}(\lambda_j)$ é o novo valor obtido para o ponto médio dentro da janela de filtragem; $S(\lambda_i)$ é o sinal do espectro verdadeiro; n é o número de pontos de amostragem ou tamanho do filtro e j é o índice do ponto médio do filtro. Podem ser aplicados filtros de média móvel com diferentes números de pontos, de modo a determinar aquele que venha a apresentar o resultado mais satisfatório. O critério de escolha baseia-se na eficiência de remoção dos ruídos sem, no entanto, remover detalhes espectrais das curvas relacionados ao alvo.

2.6.2 Análise derivativa

A derivada de uma função, conceitualmente, representa a quantização da taxa de variação de uma determinada variável em relação à outra. No caso de dados espectrais tem-se a representação da taxa de variação da reflectância espectral do alvo em relação à variação do comprimento de onda da energia incidente (DEMETRIADES-SHAH *et al.*, 1990; BARBOSA, 2005). A Figura 17 apresenta os resultados gráficos da aplicação da análise derivativa feita por Demetriades-Shah *et al.* (1990), onde foram aplicadas as derivadas de ordem 1 e 2 sobre as curvas de reflectância da cultura da beterraba, que possibilitou distinguir as feições espectrais específicas da cultura.

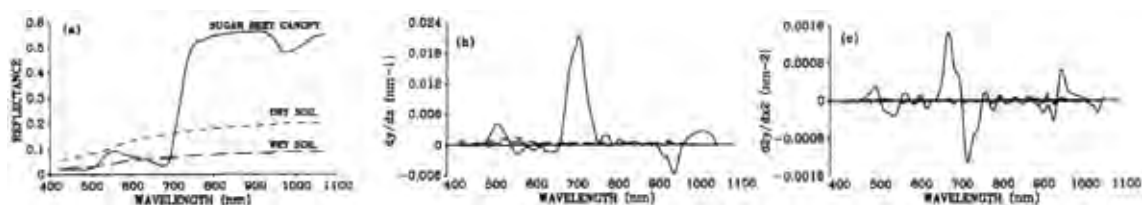


Figura 17 – Aplicação de análise derivativa (DEMETRIADES-SHAH *et al.*, 1990)

Tsai e Philpot (1998) analisaram os algoritmos de derivação de dados de reflectância. Os experimentos foram realizados utilizando curvas de reflectância da cultura da soja com diferentes níveis de magnésio. Às curvas de reflectância foi aplicada a derivada de ordem 2, adotando diferentes taxas de variação da reflectância em relação as bandas espectrais correspondentes. A Figura 18 mostra os resultados gráficos da aplicação da análise derivativa sobre espectros de reflectância de amostras de cultura da soja, adotando um $\Delta\lambda = 2,969$ nm (a) e outro de $\Delta\lambda = 74,23$ nm (b).

Os diferentes intervalos de separação de banda realçam diferentes características de absorção e espalhamento das curvas de reflectância. O espectro da segunda derivada gerado com intervalo de separação de banda de 2,5 mostra feições espectrais que se encontravam obscuras no espectro original de reflectância da soja. Essas curvas de segunda derivada facilitam identificar mudanças na curvatura entre o intervalo de comprimento de onda de 550 – 650 nm. Essas variações na curvatura são representadas pelas alterações de valores entre positiva (575 nm) a negativa (600 nm) e positiva (625 nm), novamente. O intervalo amostral 25 ($\Delta\lambda = 74,23$ nm) mostra que as curvas de reflectância da soja podem ser divididas em duas partes, mostrando que até o comprimento de onda de 580 nm a soja apresenta comportamento de absorção, enquanto os comprimentos de onda maiores apresentam padrão de reflectância.

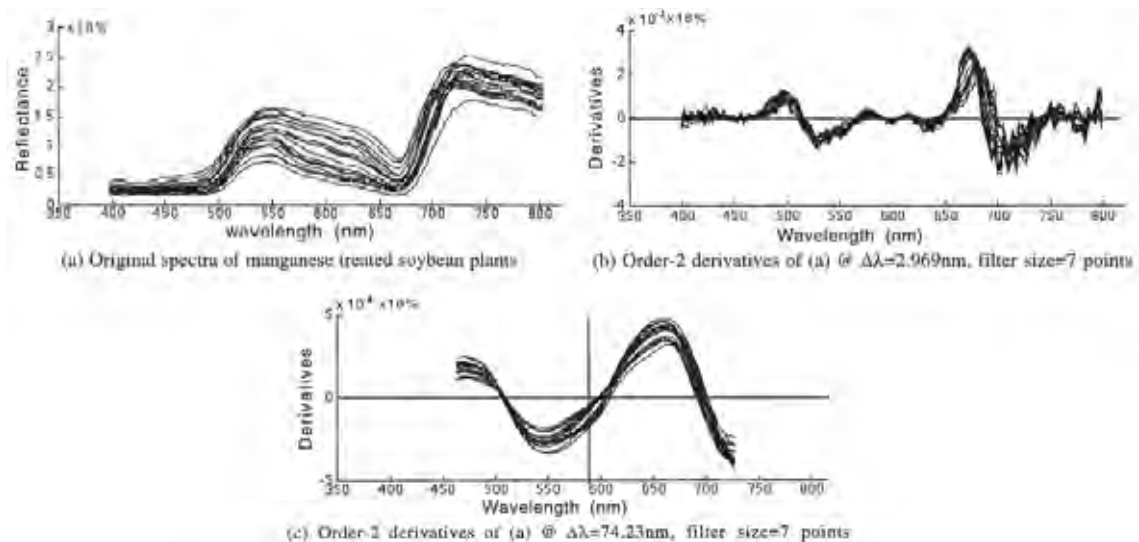


Figura 18 – Espectros da soja. (a) Reflectância; segunda derivada (b) com separação de banda de 2,5 nm e (c) 25 nm

Para estimar a derivada das curvas de reflectância, Tsai e Philpot (1998) usaram a aproximação finita por esquemas de diferenças, de acordo com a resolução de banda finita

adotada. A Equação 27 mostra a fórmula usada para estimar a primeira derivada de uma curva espectral (TSAI e PHILPOT, 1998).

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_i \approx \frac{s(\lambda_i) - s(\lambda_j)}{\Delta\lambda} \quad (27)$$

sendo que $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$ representa a separação entre as bandas adjacentes e $s(\lambda_i)$ e $s(\lambda_j)$ é o valor do espectro na faixa de comprimento de onda λ_i e λ_j , respectivamente. A estimativa da derivada de segunda ordem pode ser obtida aplicando-se a fórmula expressa na Equação 28 (TSAI e PHILPOT, 1998):

$$\left. \frac{d^2s}{d\lambda^2} \right|_i \approx \frac{s(\lambda_i) - 2s(\lambda_j) + s(\lambda_k)}{(\Delta\lambda)^2} \quad (28)$$

em que $\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_j = \lambda_j - \lambda_i$, sendo $\lambda_k > \lambda_j > \lambda_i$.

Em Sensoriamento Remoto aquático, a análise derivativa é comumente aplicada no realce de feições espectrais específicas de componentes opticamente ativas, como clorofila, turbidez e matéria-orgânica. Segundo Goodin *et al.* (1993), a partir da derivada das curvas espectrais é possível separar os efeitos dos sólidos suspensos e da clorofila. A primeira derivada é utilizada na eliminação de sinais de fundo, remoção de sobreposição entre feições espectrais e realce de componentes de menor intensidade que contribuam na composição do espectro (GOODIN *et al.*, 1993), enquanto a derivada de segunda ordem elimina a influência de sólidos em suspensão, resultando em curvas que realçam características associadas à clorofila (GOODIN *et al.*, 1993; RUNDQUIST *et al.*, 1996).

A análise derivativa de corpos d'água baseia-se, teoricamente, no pressuposto, definido por Goodin *et al.* (1993), de que a reflectância espectral de águas naturais em lagos e reservatórios turbidos podem ser caracterizados como um sinal composto, representado pela soma ponderada de componentes opticamente ativos, sólidos suspensos e clorofila algal, e da água. Assim, eles definem que a reflexão do corpo d'água é (Equação 29):

$$R = W_w r_w + W_t r_t + W_c r_c \quad (29)$$

em que R é a reflectância volumétrica composta por todos os componentes opticamente ativos; r_w , r_t e r_c são a reflectância da água, da turbidez e dos componentes clorofilados, respectivamente, e W_w , W_t e W_c são os pesos de cada componente. Assim, cada componente

do sinal composto pode ser representado por um polinômio de ordem n , e se n varia para representar um componente individual, então diferenciações sucessivas do sinal composto pode remover, sistematicamente, efeitos de ordem menor.

Vários trabalhos utilizaram a análise derivativa para detecção de feições espectrais específicas de componentes opticamente ativos, como sólidos suspensos, clorofila algal e substâncias húmicas (CHEN *et al.*, 1992; DEKKER, 1993; GOODIN *et al.*, 1993; RUNDQUIST *et al.*, 1996; CARVALHO *et al.*, 2003; ENNES *et al.*, 2010).

Segundo Goodin *et al.* (1993), aplicando-se a análise derivativa sobre as curvas de reflectância da água é possível detectar melhor as feições espectrais associadas à turbidez e à concentração de sedimentos. Quando a turbidez é alta, em geral, tem-se um alto valor de reflexão em todo o espectro de reflectância, no entanto, é na curva de derivada de ordem 1 que observa-se uma feição específica dessa variável próxima a 720 nm. Este pico, também, está altamente correlacionado com a concentração de sólidos suspensos.

Rundquist *et al.* (1996) utilizaram essa técnica na estimação da concentração da clorofila algal, na superfície da água. A Figura 19 destaca as feições na primeira derivada relacionadas com a presença de clorofila, em diferentes concentrações do pigmento. Os estudos permitiram definir que a feição presente na primeira derivada da reflectância ao redor de 690 nm é o valor que melhor determina a concentração da clorofila quando a concentração desta é relativamente alta.

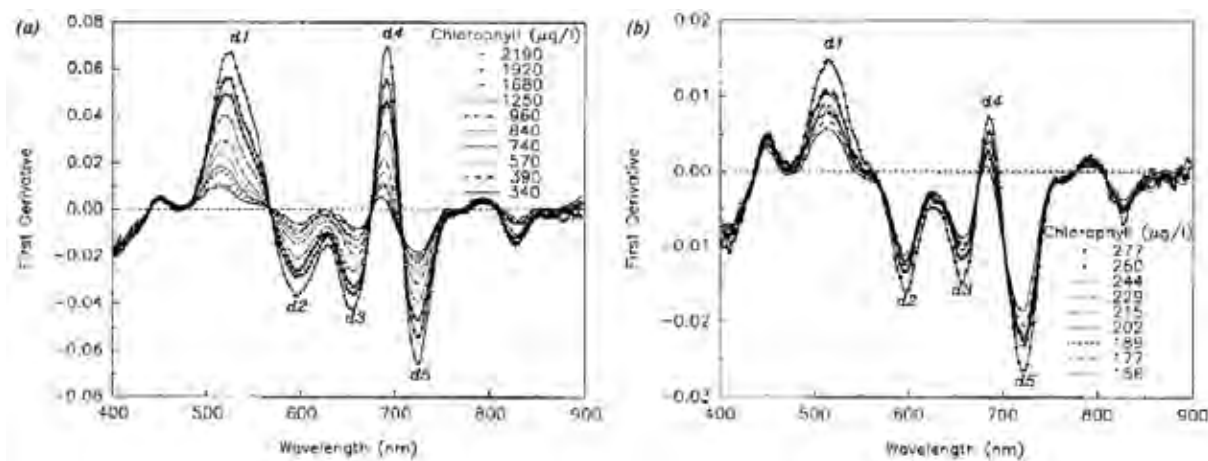


Figura 19 – Feições de clorofila algal em curvas de primeira derivada (RUNDQUIST *et al.*, 1996)

A análise derivativa foi aplicada também com o objetivo de realçar feições que pudessem ser associadas à presença de vegetação aquática submersa. A Figura 20 mostra os resultados da aplicação da análise derivativa (b) sobre os espectros de reflectância (a) analisados por Han (2002). Verifica-se que, quanto maior a proximidade da planta em relação

à superfície da água, maior o pico positivo da derivada no comprimento de onda em torno de 700 nm, e menor intensidade do pico negativo em, aproximadamente, 600 nm. O pico negativo em 720 nm, relacionado com a turbidez, tende a decrescer com o aumento da altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa.

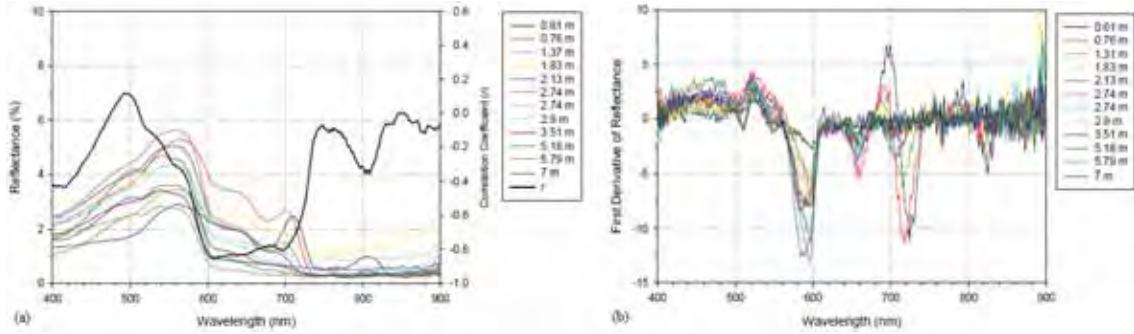


Figura 20 – (a) Curvas de reflectância e (b) de 1ª derivada de macrófitas submersas tomadas em diferentes alturas de coluna d'água sobre o dossel (HAN, 2002)

2.6.3 Remoção do contínuo

Outra técnica utilizada sobre assinaturas espectrais, aplicada para realçar algumas feições de absorção, é a remoção do contínuo. Ela é adotada para isolar e analisar uma feição de absorção específica do espectro (KRUSE *et al.*, 1993a). Nesta técnica, uma linha reta que conecta as extremidades de uma banda de absorção (pontos de máxima reflectância) é usada para definir o contínuo de cada uma das feições de absorção espectral (CLARK e ROUSH, 1984; CARVALHO *et al.*, 2003). O cálculo do espectro contínuo é dado pela equação da reta (Equação 30).

$$\rho_{Contínuo} = k\lambda + w, \quad (30)$$

em que $\rho_{Contínuo\lambda}$ é o espectro contínuo para o mesmo comprimento de onda de $\rho_{Original\lambda}$ (raio), que é o valor do espectro original. A razão entre $\rho_{Original\lambda}$ e $\rho_{Contínuo\lambda}$ é chamada de fator de remoção do contínuo ($\rho_{CR\lambda}$). As outras variáveis representam: λ o comprimento de onda para cada banda de absorção, k o coeficiente angular dado pela Equação 31, e w o coeficiente linear, obtido pela Equação 32.

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (31)$$

$$w = \frac{[\rho_1 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)] + [-\lambda_1 \cdot (\rho_2 - \rho_1)]}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (32)$$

em que ρ_2 representa a reflectância espectral observada no limite superior da feição de absorção; ρ_1 é a reflectância espectral observada no limite inferior da feição de absorção; λ_2 é o comprimento de onda do limite superior da feição de absorção; e λ_1 está representando o comprimento de onda do limite inferior da feição de absorção.

A partir do contínuo removido é possível adquirir algumas medidas que caracterizam a feição de absorção como profundidade da banda, área da feição de absorção e assimetria. A Figura 21 mostra (a) o ajuste do contínuo sobre as feições de absorção de uma curva de reflectância, representada pela linha pontilhada, e (b) a curva de reflectância normalizada com as representações dos parâmetros que podem ser extraídos da banda de absorção.

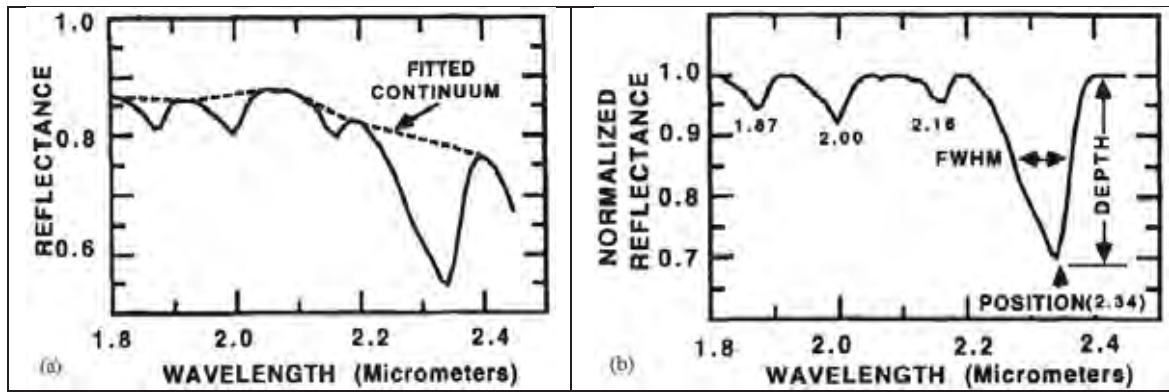


Figura 21 – Remoção do contínuo espectral (KRUSE *et al.* 1993a)

A Figura 21b mostra as medidas que podem ser obtidas a partir da curva de reflectância normalizada: profundidade da banda de absorção, área e assimetria. A profundidade de banda de absorção (*DB – Depth Band*) pode ser calculada usando a relação descrita na Equação 33.

$$DB = 1 - \frac{\rho_{Original\lambda}}{\rho_{Contínuo\lambda}} = 1 - \rho_{CR\lambda} \quad (33)$$

Outra medida quantitativa que pode ser estimada através da análise do contínuo removido é a área da feição de absorção (A_b), obtida pela aproximação desse parâmetro a área de um trapézio (Equação 34).

$$A_b = \sum_{i=m}^M \frac{(DB_i + DB_{i-1})}{2} \cdot (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \quad (34)$$

A assimetria da feição de absorção, segundo Kruse *et al.* (1993), pode ser definida como a razão da soma dos valores de reflectância para a banda da feição de absorção à direita do λ de referência, pela soma dos valores de reflectância para as bandas de feição de absorção à esquerda do λ de referência. Como resultado tem-se que as feições de absorção simétricas apresentam valor de assimetria 0 (zero), ou seja, a área da esquerda e da direita do λ de referência são iguais. Quando há uma assimetria em direção aos menores comprimentos de onda, as bandas de absorção são consideradas assimétricas negativas, e o inverso, quando as bandas têm assimetria em direção aos valores altos de comprimento de onda, a assimetria é positiva.

2.6.4 Mapeamento por ângulo espectral

Outro método de classificação de dados espectrorradiométricos é o mapeamento por ângulo espectral (*SAM – Spectral Angle Mapper*), algoritmo criado por Joe W. Boardman (YUHAS *et al.* 1992). Este método visa determinar o grau de similaridade entre curvas espectrais geradas através do registro em um grande número de bandas, ou entre curvas coletadas e curvas de referência disponíveis em bibliotecas espectrais (KRUSE *et al.* 1993b, BARBOSA, 2005).

A Equação 35 quantifica a distância entre os dois vetores, representados na Figura 22, sendo obtido a partir do arco-cosseno do produto escalar dos vetores. Esta medida é usada como grau de similaridade entre eles (BARBOSA, 2005).

$$d = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{t} \cdot \vec{r}}{\|\vec{t}\| \cdot \|\vec{r}\|} \right) \quad (35)$$

De acordo com Barbosa (2005), o *SAM* é um algoritmo com a função de determinar a similaridade espectral entre dois espectros calculando o ângulo entre eles em todas as bandas espectrais, expresso na Equação 36.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i \cdot r_i}{(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2)^{1/2} (\sum_{i=1}^{nb} r_i^2)^{1/2}} \right) \quad (36)$$

onde nb é o número de bandas; t o espectro em teste; e r o espectro de referência.

Essa medida de similaridade é insensível a fatores de ganho, uma vez que o ângulo entre os vetores é invariante em relação aos comprimentos dos vetores (KRUSE *et al.*, 1993b). Assim, o método não é influenciado por diferenças de amplitude entre os espectros, levando em consideração apenas a forma da curva (NOVO, 2008).

Carvalho *et al.* (2003) e Barbosa (2005) avaliaram diferentes técnicas de análise quantitativa no estudo de componentes opticamente ativos, dentre elas o *SAM*. Hestir *et al.* (2008) utilizaram o *SAM* em uma das etapas do mapeamento da vegetação aquática submersa, entre elas plantas daninhas aquáticas de origem brasileira, presentes no Delta da Califórnia.

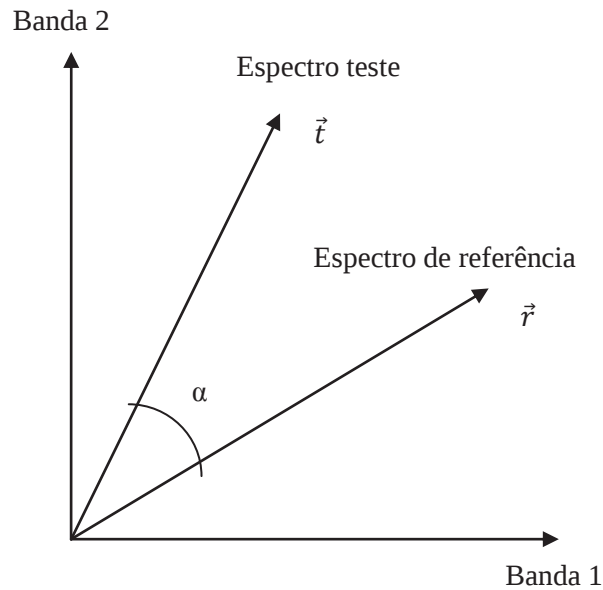


Figura 22 – Ângulo formado entre o vetor do espectro teste em relação ao vetor das curvas de referência (BARBOSA, 2005)

2.7 ONDAS ACÚSTICAS E ECOBATIMETRIA

Além das informações espectrais, outro tipo de dado que pode ser utilizado no monitoramento e mapeamento de plantas aquáticas submersas é obtido através de

levantamentos ecobatimétricos. Esses dados se baseiam em ondas acústicas formadas por meio da propagação de uma perturbação mecânica da matéria (LURTON, 2002).

Segundo Lurton (2002), a onda acústica é caracterizada: (a) pela amplitude do movimento local de cada partícula no meio de propagação ao redor de sua posição de equilíbrio; (b) pela velocidade da partícula correspondente (diferente da velocidade de propagação da onda); e (c) pela resultante da pressão acústica, ou seja, da variação em torno da pressão média hidrostática.

O espectro acústico compreende o intervalo de zero a aproximadamente 200 kHz. Existem três divisões principais dentro dessa faixa: a região de 0 – 0,020 kHz, chamada de infrassônica ou subsônica; de 0,020 – 20 kHz, a região sônica (são as frequências que o ouvido humano pode detectar); acima de 20 kHz, a região ultrassônica. Os ecobatímetros e sonares empregados na navegação utilizam, em sua maioria, a faixa mais elevada do espectro sônico (de 12 kHz para cima) e o espectro ultrassônico (especialmente, a faixa de 50 a 100 kHz) (MIGUENS, 2000).

A maior parte dos sistemas acústicos subaquáticos é projetada com o objetivo de captar ecos provenientes dos alvos específicos. Nesse sentido, a onda acústica incidente, emitida pelo sonar, será espalhada pelo alvo em todas as direções do espaço, e uma porção retroespalhada será captada pelo transmissor, como esquematiza a Figura 23. O alvo funciona como um retransmissor secundário de ondas acústicas (LURTON, 2002). Entre os instrumentos de propagação de ondas sonoras, um dos mais utilizados é o ecobatímetro. Este equipamento mede o tempo decorrido entre a emissão de um impulso sonoro e a recepção do seu eco, após refletir no alvo, obtendo-se dados subaquáticos (MIGUENS, 2000).



Figura 23 – Esquema de aquisição de dados ecobatimétricos (JENSEN, 2009)

A energia sonora emitida por um ecobatímetro chegará ao fundo e nele estará sujeita à absorção e à difusão. Embora atenuada, parte da energia será refletida no fundo, como eco, daí retornando à superfície, para refratar-se novamente para baixo. A propagação do som, utilizado por esse equipamento, depende da profundidade da coluna d'água, dos sedimentos que cobrem o leito subaquático e da movimentação da massa de água. Os fundos de lama refletem muito mal o som, enquanto os fundos de areia absorvem muito a onda sonora, constituindo-se em ótimos elementos de reflexão. A agitação da massa de água influencia, negativamente, fazendo com que as ondas se propagem de forma deficiente (MIGUENS, 2000).

Os transdutores dos ecobatímetros são responsáveis por emitir o som em uma frequência controlada, através dos efeitos de piezoelectricidade ou de magnetostricção. No primeiro caso, uma lâmina de cristal é posta em vibração sob a ação de um campo elétrico alternativo. Na magnetostricção, uma corrente alternada circulando em um solenóide faz variar continuamente o comprimento de uma barra metálica, produzindo os pulsos acústicos (MIGUENS, 2000).

Alguns trabalhos mostram resultados satisfatórios do uso de sistemas hidroacústicos no monitoramento e mapeamento de vegetação aquática submersa. Sabol e Melton (1990) desenvolveram um sistema hidroacústico acoplado ao um sistema de posicionamento global para o mapeamento de vegetação imersa. Sabol *et al.* (2002) realizaram a avaliação do uso de ecobatimetria digital na detecção de macrófitas submersas. Dekker *et al.* (2002) utilizaram dados espectrais em conjunto com informações batimétricas do fundo de estuários para o mapeamento de macrófitas submersas e grama do mar. Valley e Drake (2005) verificaram a precisão da estimativa hidroacústica de plantas aquáticas submersas. Sabol *et al.* (2009) apresentaram os resultados da integração de mapeamento acústico e gerenciamento de plantas aquáticas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentados nesse item a área de coleta dos dados, os equipamentos e aplicativos, bem como os procedimentos metodológicos para coleta e tratamento dos dados.

3.1. MATERIAIS

Neste item são apresentados a área de estudos, os equipamentos e os aplicativos necessários para aquisição de dados limnológicos *in situ*; coleta de dados hidroacústicos e de posicionamento por GPS; tomada dos dados de reflectância, radiância e irradiância, e tratamento dos dados espectralradiométricos.

3.1.1 Área de estudos

O presente estudo está vinculado a um Projeto de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), da Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica), para controle e manejo de plantas aquáticas submersas, no reservatório de Nova Avanhandava. O projeto é vinculado à FEPAF (Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais) e desenvolvido por um conjunto multidisciplinar de pesquisadores, em conjunto à empresa de geração de energia AES Tietê.

Assim, a área de estudo encontra-se inserida no contexto do reservatório da usina hidrelétrica de Nova Avanhandava, localizado no baixo curso do Rio Tiê, no Estado de São Paulo. A Figura 24 mostra uma composição colorida, RGB-543, a partir de imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*), do satélite Landsat 5, do reservatório de Nova Avanhandava, de agosto de 2010.

A usina hidrelétrica de Nova Avanhandava está localizada no município de Buritama, no Estado de São Paulo, sendo o reservatório limitado a montante pela barragem da usina hidrelétrica de Promissão, no município de Promissão, Estado de São Paulo. As obras para construção da usina iniciaram no ano de 1979, tendo sido inaugurada no ano de 1983, pela então empresa responsável na época, a estatal CESP (Companhia Energética de São Paulo). Atualmente, o reservatório de Nova Avanhandava está sob concessão da empresa de geração de energia elétrica, AES Tietê, da multinacional *AES Corporation*. A AES Tietê

disponibiliza, em sua página na internet, algumas informações sobre a usina hidrelétrica de Nova Avanhandava, como mostra a Tabela 4 (AES Tietê, 2009).

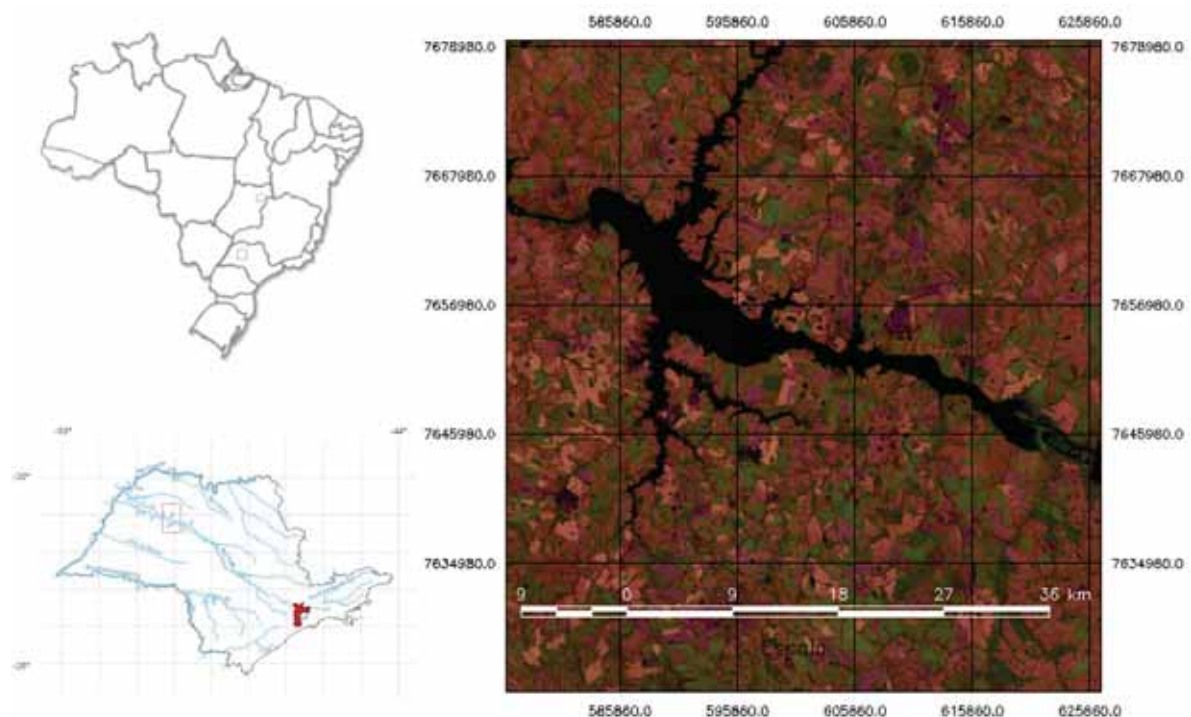


Figura 24 – Reservatório de Nova Avanhandava, no Rio Tietê, Estado de São Paulo

Tabela 4 – Dados da Usina Hidrelétrica de Nova Avanhandava

Entrada em operação	1982
Localização	Rio Tietê - Rod. SP 461, km 44 - Buritama – SP
Reservatório	Área de 210 km ² e volume de 2.830 x 106 m ³
Barragem	Terra/Concreto, comprimento: 2.038 m
Turbina	Kaplan de eixo vertical, queda bruta de 29,7 m
Gerador	Umbrella de eixo vertical e potência total de 3 x 115,8 = 347,4 MW
Vertedouro	Comporta de superfície e descarga total de 4 x 1.987 = 7.948 m ³ /s
Número de Turbinas	3
Número de Circuitos	6
Tensão Nominal	138 kV
Cota Máxima Útil	358,0 metros
Cota Mínima Útil	356,00 metros
Eclusa	Capacidade de 10 milhões de ton/ano

Fonte: AES TIETÊ, 2009.

O reservatório de Nova Avanhandava apresenta condições hidrodinâmicas, limnológicas e disponibilidade de radiação subaquática propícias ao desenvolvimento de

espécies de plantas aquáticas, principalmente submersas. Verificou-se que, nas áreas inundadas, adjacentes ao canal original do rio, foram formadas áreas de remanso, onde as águas são, geralmente, mais rasas, a velocidade é menor e a turbidez é baixa. Essas áreas são propícias ao desenvolvimento de macrófitas submersas.

O maior desenvolvimento de macrófitas imersas no reservatório de Nova Avanhandava, constatado por Cavenaghi *et al.* (2003), está relacionada com a sua disposição espacial, próximo do final da cadeia de reservatórios do Rio Tietê (Figura 25a), promovendo condições de concentração de nutrientes e transparência da coluna d'água. A Figura 25b mostra as médias anuais de dados de transparência de disco de Secchi, concentração de fósforo e clorofila-*a*, nos reservatórios localizados no Rio Tietê, disponibilizadas pela CESP (1998 apud THOMAZ, 2006).

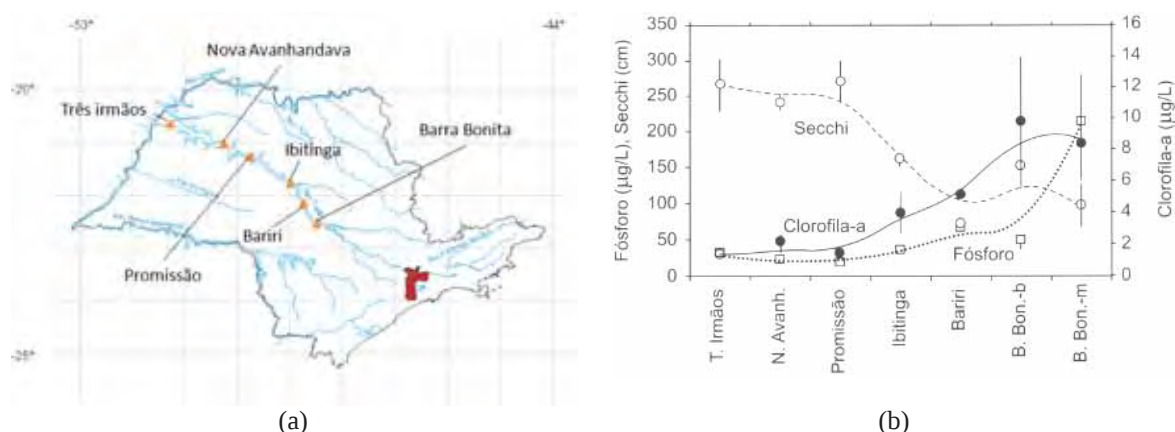


Figura 25 – (a) Cadeia de reservatórios no Rio Tietê; (b) gráfico da média anual de medidas de profundidade de disco de Secchi e concentrações de clorofila-*a* e fósforo

Apesar da alta colonização por plantas aquáticas submersas e da variabilidade de espécies no reservatório, a seleção da área de estudo considerou aspectos particulares do ambiente e custos com o levantamento de campo. O ideal seria que a área apresentasse apenas uma espécie de macrófita aquática submersa, de modo a evitar a mistura de respostas espectrais de plantas diferentes. Buscava-se, preferencialmente, que não houvesse espécies de plantas aquáticas emersas flutuantes, que pudessem causar sombreamento da vegetação submersa. Em termos de custo para realização do levantamento de campo, foi escolhida uma área próxima ao ponto de saída da embarcação, com a finalidade de diminuir gastos, principalmente com combustível.

Dessa forma, foi selecionada uma pequena área de estudo para levantamento dos dados de campo, no córrego Ferreira, próximo à confluência com o Rio Tietê, ainda no reservatório de Nova Avanhandava. A Figura 26 ilustra a área de estudo, a partir de uma

composição colorida RGB-543, utilizando imagens do sensor TM, Landsat 5, de agosto de 2010. Quase toda extensão de suas margens é coberta por uma pequena quantidade de mata ciliar ou vegetação aquática imersa enraizada. Entre as atividades antrópicas existentes na área do entorno destacam-se a pecuária e o plantio de cana-de-açúcar.

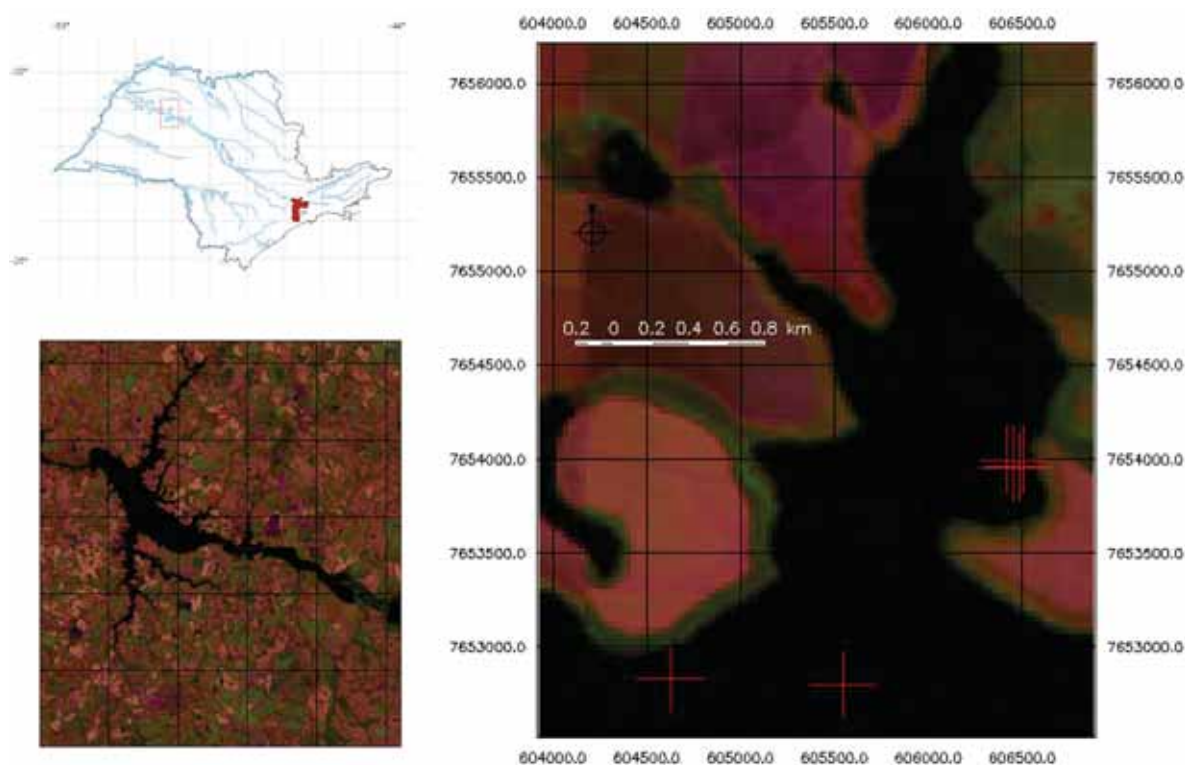


Figura 26 – Área de estudo – córrego Ferreira, reservatório de Nova Avanhandava

Durante a etapa de seleção da área de estudo, a escolha de outras áreas foi cogitada, no entanto, fatores como a presença excessiva de algas foi uma razão para descarte dessas áreas. Provavelmente, devido à extensiva atividade agrícola nas áreas adjacentes ao reservatório, com aplicação de fertilizantes agrícolas a partir de aviões, verifica-se em muitas áreas *bloom* de algas de formato coloidal (colônias). A presença dessas partículas clorofiladas pode interferir nas curvas de reflectâncias da vegetação submersa, mascarando ou superestimando feições das macrófitas. O córrego Ferreira também apresenta esse tipo de alga, no entanto, em uma quantidade menor em comparação a outras regiões da represa.

3.1.2 Equipamentos e aplicativos

Neste trabalho, foram utilizados equipamentos e aplicativos para aquisição e processamento de dados: limnológicos, ecobatimétricos e radiométricos.

- *Equipamentos de aquisição de dados limnológicos in situ*

Foram tomadas as seguintes medidas limnológicas com os respectivos instrumentos de coleta:

- ✓ transparência de disco de Secchi;
- ✓ turbidez, utilizando um turbidímetro digital portátil/bancada *AP 2000 – Polincontrol*;
- ✓ temperatura da água e oxigênio dissolvido, mensuradas adotando um oxímetro portátil *Lutron*, modelo *DO – 5510*
- ✓ pH (potencial Hidrogeniônico), utilizando pHmetro microprocessado *210P Universo*.

- *Ecobatímetro, GPS e aplicativos de aquisição de dados hidroacústicos*

Para a aquisição de dados de sensoriamento remoto acústico foi utilizado um ecobatímetro digital e científico, modelo *DT-X*, da *BioSonics*. Esse ecobatímetro é composto por um sonar que emite e recebe pulsos acústicos e uma maleta. À maleta é acoplado um computador que armazena e processa os dados acústicos; um receptor GPS (*Global Positioning System*), modelo *SPS361*, da *Trimble*, conectado a uma antena *SPS MSK Trimble*; um cabo conectado ao transdutor e uma bateria de carro. Esse GPS possui alta precisão, pois recebe correção em tempo real tipo *OmniSTAR VBS*. Dessa forma, os dados hidroacústicos são georreferenciados simultaneamente à coleta. Para sustentação do sonar e da antena GPS foi utilizada uma estrutura metálica (SABO BOSCHI, 2011). A Figura 27 apresenta como esse suporte se encontra instalado na embarcação. Para configuração do ecobatímetro e aquisição dos dados hidroacústicos é utilizado o aplicativo *Visual Aquisition*, da *BioSonics*.



Figura 27 – Suporte de sustentação do sonar e da antena GPS

- *Espectrorradiômetro, suporte e aplicativos de aquisição e processamento dos dados*

As medidas espectrorradiométricas, de reflectância, de radiância ascendente e de irradiâncias ascendente e descendente, foram realizadas utilizando um espectrorradiômetro *FieldSpec®*, modelo portátil *HandHeld UV/NIR*, da empresa *ASD_{Inc}* (*Analytical Spectral Devices*). Os dados são adquiridos com o auxílio do software *RS^{3TM}*, da *ASD_{Inc}*, que permite ajustar parâmetros como número de elementos amostrais por ponto de coleta e o tipo de lente para especificar a grandeza radiométrica a ser registrada.

As medidas de radiância e irradiância foram coletadas tanto logo acima da superfície quanto dentro da coluna d'água. Para aquisição dessas medidas é necessário o uso de um cabo de fibra óptica acoplado ao espectrorradiômetro (Figura 28a), e lentes apropriadas para coleta de cada grandeza radiométrica a ser registrada (Figura 28b). Foram utilizadas as lentes *UW RCR* (*Remote Cosine Receptor*), lente projetada para aquisição de dados de irradiância, e *UW FOV* (*Field of View* – campo de visada), com ângulo de abertura da lente de 20°, utilizado na coleta de dados de radiância. A diferença entre as duas lentes reside no fato de que o campo de visada da primeira permite receber energia de todo hemisfério.



(a)



(b)

Figura 28 – Equipamentos necessários para tomada de medidas subaquáticas. (a) Espectrorradiômetro, cabo de fibra óptica e lente; (b) lentes para medidas de irradiância e radiância

O cabo de fibra óptica é uma estrutura frágil, de 5 metros de comprimento, susceptível a rompimentos somente com o peso da lente suspensa. Por esta razão, foi adaptado um suporte que dá sustentação ao cabo, impedindo que ele se dobre e/ou torça. Essa estrutura possui 3 metros de comprimento, é feita em alumínio revestido com material isolante preto fosco (Figura 29a), com o objetivo de minimizar a interferência da reflexão do suporte sobre a medida registrada pela lente. Nesse cabo foi acoplada uma pequena estrutura para apoio das lentes e feita marcações que permitissem que na posição de coleta houvesse um espaçamento vertical de 10 cm (Figura 29). Dado que as medidas são feitas com o cabo a

uma inclinação de 30° em relação à superfície d'água, foi também acoplado ao cabo um nível bolha para auxiliar que as medidas sejam tomadas na posição nadir.

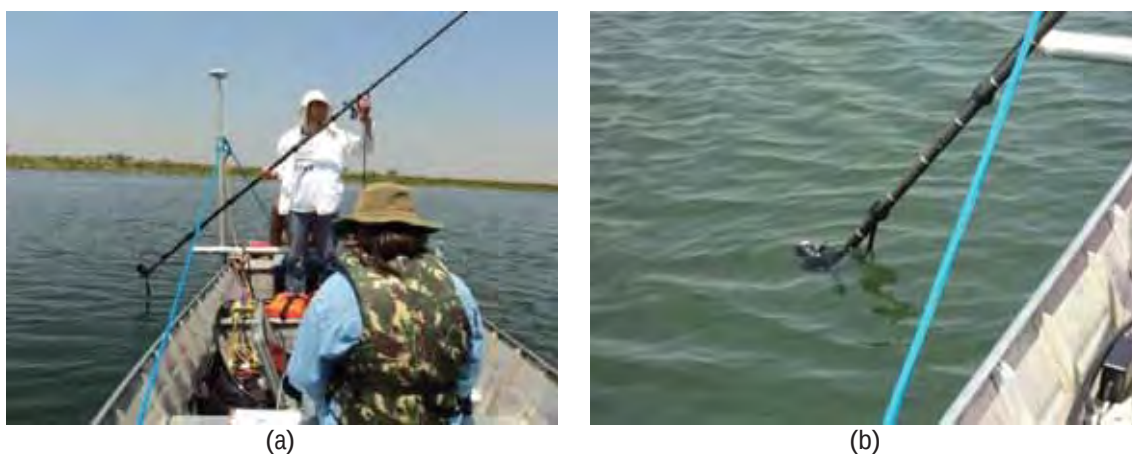


Figura 29 – (a) Aquisição de radiância e irradiância espectral; (b) controle da profundidade e inclinação na tomada dos dados

- *Aplicativos utilizados no tratamento dos dados espectrais*

- ✓ Aplicativo *ViewSpecPro™*, da empresa *ASD (Analytical Spectral Devices)* – conversão dos dados espectralradiométricos em arquivo texto;
- ✓ Software *Excel*, do pacote *MicrosoftOffice*, da *Microsoft* – cálculo da média amostral dos dados de reflectância, radiância e irradiância, cálculo da primeira e segunda derivada dos espectros de reflectância, aplicação da técnica de remoção do contínuo e ajuste de modelo exponencial para os dados de radiância ascendente;
- ✓ Software *MATLAB* – implementação do algoritmo de mapeamento por ângulo espectral (*SAM*);
- ✓ Software estatístico *MINITAB* – aplicação da análise de agrupamento e ajuste de modelo de regressão linear para os dados de radiância ascendente.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos do presente trabalho são constituídos, basicamente, pelas etapas de levantamento de dados de campo; processamento dos dados e a análise dos resultados para estimar a altura máxima da coluna de água que não limita a classificação de regiões colonizadas por macrófitas submersas e para definir os comprimentos de onda que melhor representam o comportamento espectral da vegetação aquática submersa. O fluxograma da Figura 30 esquematiza as etapas de execução do presente estudo.

O presente trabalho foi inicializado com levantamentos de campo exploratórios realizados nos dias 19 e 20 de outubro de 2010; 5 e 6 de janeiro de 2011 e 16 a 18 de fevereiro de 2011, em diferentes pontos do reservatório de Nova Avanhandava, Rio Tietê, Estado de São Paulo. Essas três campanhas de campo visaram definir a área de estudos, os dados necessários e a metodologia de coleta dos dados que inclui determinação dos equipamentos e esquema de amostragem dos dados.

Assim, o levantamento de campo principal foi realizado em uma pequena área selecionada, inserida no córrego Ferreira. Os dados necessários coletados foram: de reflectância, limnológicos (turbidez, Secchi, pH e temperatura), ecobatimétricos, de radiância e irradiância (nos sentidos ascendente e descendente, tanto subaquáticos quanto logo acima da superfície) e de posicionamento por GPS. Em relação aos dados de temperatura da água e de pH, esses, além de caracterizar os pontos de coleta, foram utilizados como parâmetros de entrada para configuração do ecobatímetro.

Os dados espectralradiométricos coletados (reflectância, radiância e irradiância) foram, inicialmente, pré-processados no aplicativo *ViewSpecProTM*, onde os arquivos são convertidos para o formato texto. Nesse formato, é então feito o cálculo a média dos elementos amostrais e posterior aplicação de técnicas de suavização das curvas espectrais e realce de feições.

Feito o pré-processamento dos dados espectrais (filtragem), foi aplicada às curvas de reflectância as técnicas de análise derivativa (de primeira e segunda ordem) e remoção do contínuo: a primeira com o objetivo de realçar as feições características de presença de vegetação aquática submersa e a segunda para obter os parâmetros de banda de feições de absorção para ser utilizados como dados de entrada de uma das abordagens de classificação adotadas neste trabalho.

Posteriormente, foi feita a classificação dos dados espectrais com o intuito de discriminar o sinal da vegetação aquática submersa. Foram adotadas duas abordagens de classificação, sendo uma não-supervisionada baseada em análise de agrupamento (técnica de estatística multivariada), e outra supervisionada, utilizando mapeamento por ângulo espectral (SAM). Na análise de agrupamento foram testados diferentes dados de entrada, como espectro de reflectância, espectros de 1ª e 2ª derivada e os parâmetros de banda gerados com a remoção do contínuo. Na classificação por SAM foram testados diferentes intervalos de comprimento de onda, principalmente, entre os picos no verde e *red edge*, e entre os picos no *red edge* e 810 nm.

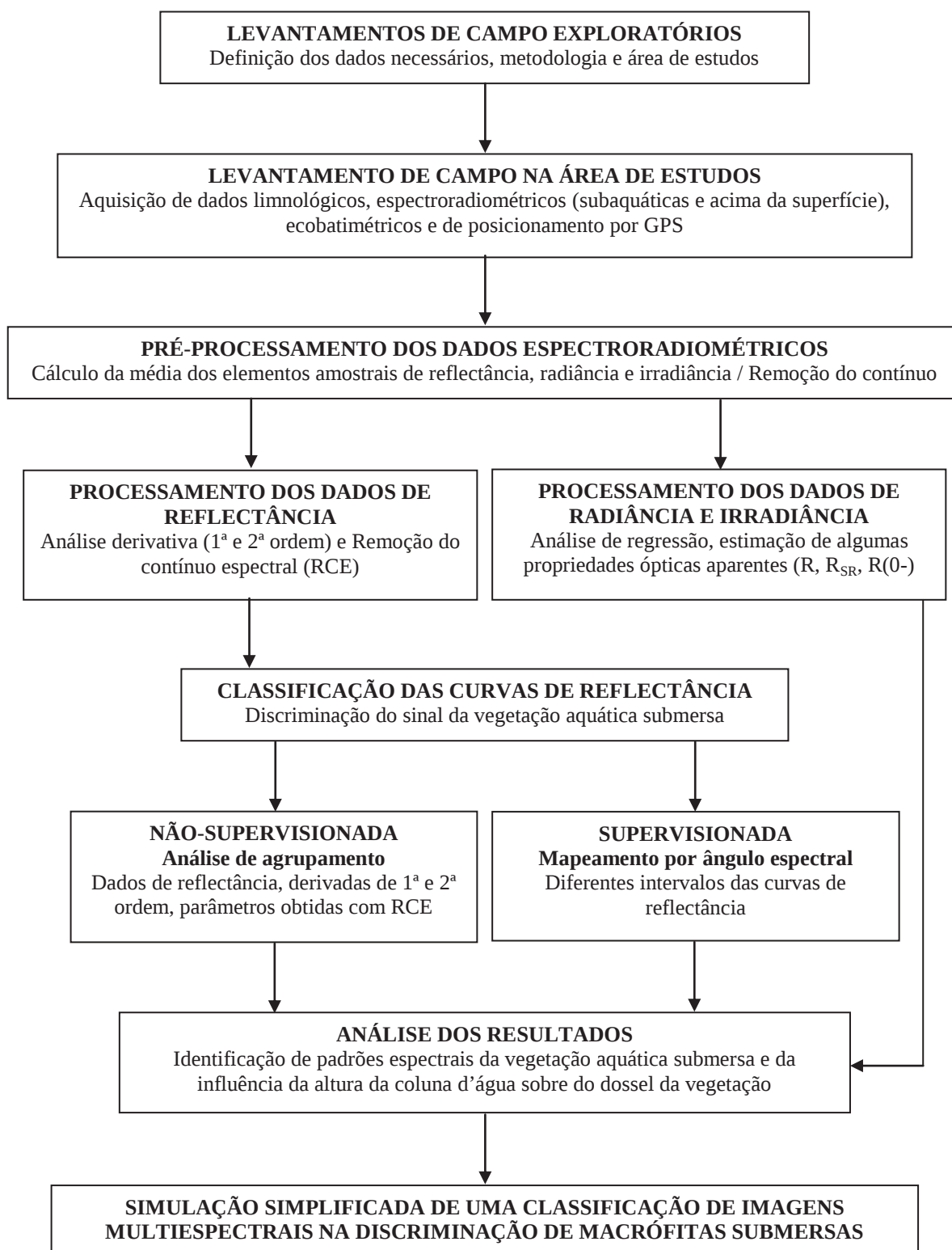


Figura 30 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos

Foi realizado também o processamento dos dados de radiância e irradiância. Primeiramente, foi aplicada análise de regressão para ajuste de modelo que representa o processo de atenuação da radiação ao longo da coluna d'água. Foram testados alguns tipos de modelos e para avaliação do mais adequado foram aplicada a análise de variância (ANOVA) e a análise dos resíduos da regressão. Foram ainda estimados os espectros de algumas

propriedades ópticas aparentes, como a reflectância de sensoriamento remoto, a reflectância de irradiância ou razão de irradiância, tanto de subsuperfície quanto subaquáticas.

Processado os dados de reflectância, radiância e irradiância foi feita uma análise dos resultados obtidos, buscando identificar padrões espectrais de pontos com e sem vegetação aquática submersa e da influência da altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação.

Por fim, foi realizada uma simulação simplificada de uma classificação de imagens multiespectrais na discriminação do sinal da vegetação aquática submersa. Foram adotados os intervalos de banda dos sistemas sensores comerciais *WorldView-2* e *RapidEye*. Foi calculada a média da reflectância para cada banda espectral, dos espectros de todos os pontos de coleta. Esses valores foram utilizados com dados de entrada da classificação por análise de agrupamento.

3.2.1 Levantamentos de dados em campo

No primeiro levantamento de campo foram coletados dados de reflectância espectral e de algumas variáveis limnológicas, como profundidade de disco de Secchi; turbidez; temperatura da água; oxigênio dissolvido e pH. Também foram feitas a identificação das espécies de macrófitas presentes, registro fotográfico do ambiente de coleta e anotações das condições do ambiente nos pontos de coleta, como nebulosidade, vento, ondulação da superfície da água e cobertura da terra nas margens do reservatório.

Os dados de reflectância espectral coletados nesse levantamento exploratório foram importantes para uma análise preliminar do comportamento espectral das macrófitas submersas. De acordo com as observações das curvas foi possível verificar algumas características espectrais que podiam estar associadas com a altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa, definida como a distância entre o dossel das plantas aquáticas submersas à superfície d'água.

O planejamento do segundo e do terceiro levantamentos de campo consistiu na definição da área de estudo, dos dados necessários para realização deste estudo e da metodologia de coleta e amostragem desses dados. A partir do segundo levantamento foi introduzido o uso do ecobatímetro para aquisição de dados de profundidade da coluna d'água, altura da planta e estimação indireta da altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa.

A altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação é uma variável muito importante a ser associado às medidas de reflectância espectral da vegetação, no entanto, determinar essa altura, no ponto de coleta de reflectância, foi um dos principais problemas enfrentados. Inicialmente, cogitou-se em utilizar os dados hidroacústicos para estimar essa medida. No entanto, devido à alta heterogeneidade da altura e cobertura do dossel das plantas aquáticas submersas, não havia como garantir que os dados coletados com ecobatímetro coincidisse às verdadeiras condições do dossel da planta no exato ponto de aquisição dos dados radiométricos, mesmo com o barco parado.

Além disso, em regiões onde as macrófitas estão mais próximas à superfície, o uso dos dados acústicos é ineficaz, pois a posição do sonar a 50 centímetros abaixo da superfície impede que sejam adquiridos dados da vegetação acima dessa profundidade. Nessas áreas, a altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação é mensurada com o auxílio do disco de Secchi e/ou com uma trena. Assim, a altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação estimada a partir de dados ecobatimétricos só foram utilizados em casos especiais, onde as plantas não eram vistas a olho nu ou na identificação de áreas sem vegetação.

Assim, no levantamento de campo principal, em 27 a 29 de setembro de 2011, os dados ecobatimétricos foram úteis na seleção dos pontos de amostragem. No primeiro dia, foi realizado um levantamento ecobatimétrico em praticamente toda a margem do córrego Ferreira, a fim de verificar as condições de infestação por plantas aquáticas submersas e selecionar uma área que apresentasse as condições adequadas pré-determinadas em campos anteriores.

Os dados hidroacústicos permitem, em tempo real, identificar áreas homogêneas com macrófitas imersas ou sem plantas, propícias à tomada de dados espectralradiométricos. Isso é possível, pois o software *Visual Aquisition* disponibiliza em seu *display* um ecograma com os dados de batimetria e altura da vegetação. Esses dados hidroacústicos auxiliaram na identificação de colônias de macrófitas submersas em áreas onde essas não eram vistas a olho nu, bem como no controle da altura da coluna d'água nos pontos de coleta dos dados quando não há presença de vegetação aquática submersa.

A partir do segundo dia, foi realizada a tomada dos dados espectralradiométricos. Das 20 amostras de reflectância, 15 foram coletadas em áreas com vegetação aquática submersa com diferentes graus de infestação e altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação. Foram realizadas medições tanto em pontos com e sem plantas aquáticas submersas. A Tabela 5 apresenta os pontos de coleta dos dados espectralradiométricos e as

amostras coletadas em cada um dos pontos. Essa mesma tabela informa a(s) grandeza(s) radiométrica(s) coletada(s) em cada ponto, a presença ou ausência da vegetação aquática submersa, a altura da coluna d'água sobre o dossel das plantas para as amostra com vegetação, e a turbidez.

Tabela 5 – Descrição da amostragem

Data	Canal	Estação de coleta	Amostras	R*	E, L*	VAS*	Altura da coluna (m)	Turbidez (NTU)
28/set	Cór. Ferreira	M01	M01		X	SIM	1	2,96
	Cór. Ferreira	M02	M02		X	SIM	0,2	1,44
	Cór. Ferreira	M03	M03		X	SIM	0,2	1,42
	Cór. Ferreira	M04	M04		X	SIM	0,6	-
	Cór. Ferreira	M05	M05		X	SIM	0,6	-
29/set	Cór. Ferreira	M06	M06	X		NÃO	S/P**	1,98
	Cór. Ferreira	M07	M07	X		SIM	0,15	1,31
	Cór. Ferreira	M07	M08	X		SIM	0,01	1,31
	Cór. Ferreira	M07	M09	X		SIM	0,2	1,31
	Cór. Ferreira	M07	M10	X		SIM	2	1,31
	Cór. Ferreira	M07	M11	X		SIM	0,46	1,31
	Cór. Ferreira	M07	M12	X		SIM	0,07	1,31
	Cór. Ferreira	M13	M13	X		NÃO	S/P**	2,16
	Cór. Ferreira	M13	M14	X		NÃO	S/P**	2,16
	Cór. Ferreira	M13	M15	X		SIM	3	2,16
	Cór. Ferreira	M05	M16	X		SIM	0,63	1,67
	Cór. Ferreira	M05	M17	X		SIM	1	1,67
	Cór. Ferreira	M05	M18	X		SIM	0,22	1,67
	Cór. Ferreira	M19	M19	X		SIM	0,15	1,41
	Cór. Ferreira	M19	M20	X		SIM	0,3	1,41
	Cór. Ferreira	M19	M21	X		SIM	0,5	1,41
	Cór. Ferreira	M19	M22	X		SIM	0,05	1,41
	Cór. Ferreira	M23	M23	X		SIM	2	1,45
	Cór. Ferreira	M23	M24		X	SIM	2	1,45
	Cór. Ferreira	M25	M25		X	NÃO	S/P**	1,2
	Rio Tietê	M25	M26	X		NÃO	S/P**	1,2
	Rio Tietê	M27	M27	X		NÃO	S/P**	1,2

* R, E, L e VAS representam, respectivamente, reflectância, irradiância, radiância e vegetação aquática submersa. ** S/P – sem plantas aquáticas submersas

Nota-se na Tabela 5 que em cada estação de coleta que apresenta macrófitas submersas, foram adquiridas mais de uma amostra de reflectância, no entanto, em diferentes

posições, mudando a altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação. Entre as amostras com macrófitas submersas, verifica-se uma variação entre poucos centímetros da superfície (0,01 m) a bem distantes dela (3 m). Somente duas amostras foram coletadas em local de coluna d'água mais profunda (15 e 20 m). Os dados dessas duas amostras foram utilizados como referência, representativo de águas opticamente profundas.

A amostra de reflectância com o dossel da planta a 3 metros de profundidade (M15) foi coleta em uma região com 6 metros de profundidade de coluna d'água. Essa profundidade pode ser considerada limítrofe a presença de macrófitas submersas na área de estudo, no período de levantamento dos dados, uma vez que em profundidade superiores a 6 m não foi verificada colonização, de acordo com os dados ecobatimétricos. Um exemplo disso são as amostras sem vegetação submersa tomadas em locais com profundidade de 6 m (M13 e M14). As outras amostras sem presença de plantas aquáticas submersas foram coletadas em locais muito rasos próximos às margens (M06) e em locais muito profundos que não dispõem de condições para o desenvolvimento das plantas (M25, M26 e M27).

As medidas de reflectância tomadas em locais de águas profundas visaram à aquisição de assinaturas espectrais semelhantes à de águas opticamente profundas, ou seja, assinaturas que apresentam apenas contribuição da radiação da coluna d'água, sem influência da reflexão de fundo. Foram selecionados dois pontos de coleta, localizados no canal do Rio Tietê, próximos a confluência com o córrego Ferreira, onde foram coletadas as demais amostras. Assim, foram coletadas três amostras (M25, M26 e M27) com profundidade variando de 15 a 20 m. Essas observações foram tomadas fora do córrego Ferreira, pois não foram identificados pontos com profundidade superior a 10 metros neste córrego, segundo os dados ecobatimétricos. A partir da análise desses dados esperava-se obter algum resultado que os diferenciasse de curvas coletadas em águas opticamente rasas, sem plantas aquáticas submersas.

Para minimizar a influência de componentes opticamente ativos da água, os dados foram coletados em áreas homogêneas, em termos de turbidez. O fato de não ser necessário um grande deslocamento do barco para encontrar estações de coleta com características apropriadas contribuiu na escolha de uma área de estudo muito pequena que ajudasse a garantir o estado de homogeneidade da água. Em relação às estações de coleta no canal do Rio Tietê (15 – 20 m de profundidade de coluna d'água), eles apresentam um nível de turbidez menor, no entanto, com pouca diferença, variando entre 0,11 a 0,94 NTU.

Além das medidas de reflectância, foram tomados dados de radiância (ascendente) e irradiância (ascendente e descendente). Foram coletadas tanto medidas subaquáticas quanto

logo acima da superfície dessas grandezas radiométricas, em pontos com e sem plantas aquáticas submersas. O principal objetivo da mensuração dos dados subaquáticos foi analisar o decréscimo de energia no meio aquático. A coleta das medidas subaquáticas foi feita até uma profundidade máxima, limitada pela presença do dossel da vegetação aquática submersa, fundo ou comprimento do cabo de fibra óptica disponível para medição (2 m).

No primeiro ponto de coleta das medidas de radiância e irradiância, foi adotado um intervalo vertical de 10 cm, entre uma profundidade e outra de tomada dos dados, com uma repetição de 10 vezes (10 elementos amostrais por profundidade). No entanto, o tempo requerido para otimização do equipamento torna lenta a amostragem dessas medidas. Por esse motivo, o intervalo de profundidade foi aumentada para 20 centímetros e a repetição foi reduzida para 3 vezes. Foram coletados dados de radiação subaquática em 7 pontos de coleta, dos quais nem todos puderam ser aproveitados por problemas durante a aquisição dos dados.

3.2.2 Processamento dos dados

Os dados espectrorradiométricos de reflectância; radiância (ascendente) e irradiância (ascendente e descendente), coletados no último levantamento de campo, foram inicialmente processados e salvos em arquivos do tipo texto, utilizando o aplicativo *ViewSpecProTM*, da empresa *ASD*. Esse *software* permite a visualização dos espectros das grandezas radiométricas registradas e o cálculo de suas derivadas. Os arquivos texto são gerados no formato de tabelas, facilitando a manipulação dos dados. Dessa forma, foi feito o cálculo das médias dos elementos amostrais de reflectância, radiância ascendente e irradiância ascendente e descendente, utilizando o aplicativo *Excel*.

Foi observada nas curvas de reflectância a presença de ruídos, decidindo-se pela aplicação de alguma técnica de suavização. Assim, optou-se pelo método de filtragem por média móvel. Foram testados filtros de 3, 5, 7, 11 e 21 pontos. A partir das curvas filtradas foram aplicadas duas técnicas quantitativas de realce de feições espectrais presentes em curvas de reflectância: a análise derivativa e a remoção do contínuo, ambas realizadas no *Excel*.

Foram aplicadas, nas curvas de reflectância, as derivadas de primeira e segunda ordem. A primeira derivada foi gerada adotando um *gap* de 7 pontos e a segunda, um intervalo maior, de 21 pontos. A literatura (HAN, 2002) apresenta as principais feições da primeira derivada associadas à presença de plantas aquáticas submersas que podem ser

comparadas com os resultados obtidos com esta análise. Por outro lado, referências da aplicação da derivada de ordem 2 não foram encontradas. No entanto, ela foi adotada, de modo a tentar identificar alterações no padrão das curvas com ou sem a presença da vegetação aquática submersa, como foi constatado e é apresentado nos resultados.

A técnica de remoção do contínuo é uma técnica não comumente aplicada em estudos de corpos d'água. Por este motivo, não foram escolhidas feições de absorção específicas que poderiam estar relacionadas mais a algum componente opticamente ativo do que a presença de plantas aquáticas submersas. No caso deste estudo, a aplicação dessa técnica visou identificar variações em dois grandes intervalos de comprimento de onda, os quais foram verificados alterações de forma nos espectros de reflectância, promovendo mudanças nos parâmetros de banda obtidos com a remoção do contínuo. Foram feitos diversos testes com diferentes bandas, sempre entre os intervalos da região do espectro visível, no amarelo e no vermelho, e o outro na região do infravermelho próximo, entre 700 – 810 nm. Neste trabalho, além de permitirem realçar bandas de absorção, os parâmetros de banda foram utilizados como dados de entrada na análise de agrupamento para classificação dos espectros de reflectância.

A distinção de curvas espectrais de ambientes aquáticos com ou sem a presença de plantas aquáticas submersas é uma maneira de avaliar a contribuição da resposta espectral das macrófitas imersas sobre a radiação registrada acima da superfície da água. Neste sentido, foram aplicadas técnicas de classificação não-supervisionada, baseada em análise multivariada, e supervisionada a partir da abordagem por mapeamento por ângulo espectral (SAM).

A análise de agrupamento foi feita utilizando o aplicativo estatístico *Minitab*. Essa técnica multivariada foi aplicada para avaliar sua capacidade de distinguir as curvas de reflectância com presença e ausência de plantas aquáticas submersas, bem como diferenciar os pontos com vegetação aquática submersa, em termos de intervalos de altura de coluna d'água sobre o dossel. Foram feitos diversos testes, utilizando diferentes tipos de dados de entrada: reflectância; derivada de ordem 1 e 2 da reflectância; e parâmetros de banda obtidas com a remoção do contínuo, separadamente. Nesta análise foram testados diferentes algoritmos de ligação e medidas de distância. A partir da análise dos resultados gerados, optou-se pela adoção do agrupamento por observações, utilizando o método de ligação média, que geram agregados com pequena variação interna (HAIR *et al.*, 2009). A medida de distância escolhida foi o quadrado da distância Euclidiana e o nível de similaridade adotado para separação dos agrupamentos foi de 95.

O algoritmo de classificação supervisionada das curvas de reflectância, pelo mapeamento por ângulo espectral, foi implementado no aplicativo *MATLAB*. Dentre as 20 curvas de reflectância coletadas, foram selecionadas algumas para serem testadas como vetores de referência na classificação. Essa seleção foi baseada, principalmente, em temas de profundidade de coluna d'água e altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa. Foram testadas classificações com diferentes números de classes. Por fim, foi escolhida a classificação com 8 curvas de referência que apresentou bom resultado e afim que o resultado pudesse se comparado ao da abordagem não-supervisionada.

Após a identificação dos padrões e dos comprimentos de onda representativos do comportamento espectral da vegetação aquática submersa, foi realizada uma simulação simplificada de classificação de dados multiespectrais, para avaliar a capacidade de identificação de plantas aquáticas submersas. Para estimação do valor médio de reflectância de uma banda para um dado ponto foram adotados intervalos espectrais de bandas dos sensores *WorldView-2* e *RapidEye*, por oferecerem uma maior diversidade de bandas espectrais no visível, nas quais a capacidade de penetração na coluna d'água é maior do que em comprimentos de onda maiores. A Tabela 6 apresenta os intervalos de comprimento de onda das bandas dos dois sensores.

Tabela 6 – Bandas dos sensores multiespectrais *WorldView-2* e *RapidEye*

Intervalo espectral	Comprimento de onda (nm)	
Bandas	<i>WorldView-2</i>	<i>RapidEye</i>
Pancromático	450 – 800	–
Costal	400 – 450	–
Azul	450 – 510	440 – 510
Verde	510 – 580	520 – 590
Amarelo	585 – 625	–
Vermelho	630 – 690	630 – 685
Vermelho limítrofe (<i>Red Edge</i>)	705 – 745	690 – 730
Infravermelho próximo – I	770 – 895	760 – 850
Infravermelho próximo – II	860 – 1040	–

No entanto, esta simulação não levou em consideração fatores importantes como a curva de sensibilidade das banda dos sensores para estimação do valor de reflectância. Outros aspectos como a interferência atmosfera e os parâmetros de calibração dos sensores para conversão dos valores de reflectância em radiância e valor de brilho devem ser levados em consideração, sendo comumente empregados em trabalhos inversos a este, para o cálculo da reflectância em imagens (GÜRTLER *et al.*, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2009). Por esta razão, essa simulação não tem como objetivo avaliar o desempenho do uso das imagens desses

sensores na identificação e mapeamento da vegetação aquática submersa, mas, verificar a capacidade dos dados multiespectrais em distinguir amostras com e sem plantas aquáticas submersas.

A partir dos dados de radiância (ascendente) e irradiância (ascendente e descendente) coletados, foram gerados gráficos de cada uma das grandezas, em intervalos de profundidade de coluna d'água de 10 cm ou 20 cm. Dessa forma, foi possível analisar o processo de atenuação da luz nos diferentes comprimentos de onda, bem como analisar o comportamento espectral dessas grandezas em termos de intensidade de absorção e espalhamento associada à resposta espectral da vegetação aquática submersa.

De acordo com a análise dos dados de reflectância, radiância e irradiâncias, foram identificados feições de absorção e espalhamento associados à presença de vegetação aquática submersa. Assim, foram selecionados alguns desses comprimentos de onda e aplicado sobre eles uma análise de regressão para estimar um modelo que explicasse a atenuação da radiação ao longo da coluna d'água, em pontos com macrófitas submersas. O ajuste do modelo de regressão foi feito a partir dos dados de radiância ascendente em relação às profundidades de coleta dos dados subaquáticos.

Foram avaliados diferentes modelos de ajuste com o objetivo de determinar aquele que melhor caracteriza o processo de atenuação da radiância ascendente. Os modelos de regressão linear foram gerados no aplicativo estatístico *Minitab*, enquanto que o ajuste exponencial foi feito no software *Excel*. Para testar a qualidade do modelo gerado foi empregada a análise de variância (ANOVA) e a análise dos resíduos da regressão.

A partir das medidas de radiância e irradiância foram estimadas três propriedades ópticas aparentes: a reflectância de sensoriamento remoto, a reflectância de subsuperfície e a razão de irradiância em diferentes profundidades. Foram analisadas características dessas grandezas, bem como feita a identificação de feições espectrais que pudessem ser associadas à resposta espectral da vegetação aquática submersa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o levantamento de campo e tratamento dos dados são divididos em: caracterização do ambiente de coleta dos dados, análise de agrupamento adotando dados de diferentes naturezas como entrada da classificação, mapeamento por ângulo espectral, análise derivativa, simulação de classificação utilizando dados multiespectrais e estimação do processo de atenuação da radiação, bem como de algumas propriedades ópticas aparentes.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE DE COLETA DOS DADOS

A partir dos levantamentos de campo exploratórios realizados no reservatório de Nova Avanhandava, em outubro de 2010, janeiro e fevereiro de 2011, foram identificadas quatro espécies de macrófitas submersas: a *Cabomba sp.*, a *Ceratophyllum demersum*, a *Egeria najas* e a *Chara sp.* (Figura 31). Estas espécies podem ser encontradas em épocas de águas mais quentes (janeiro), crescendo conjuntamente, no córrego Ferreira.

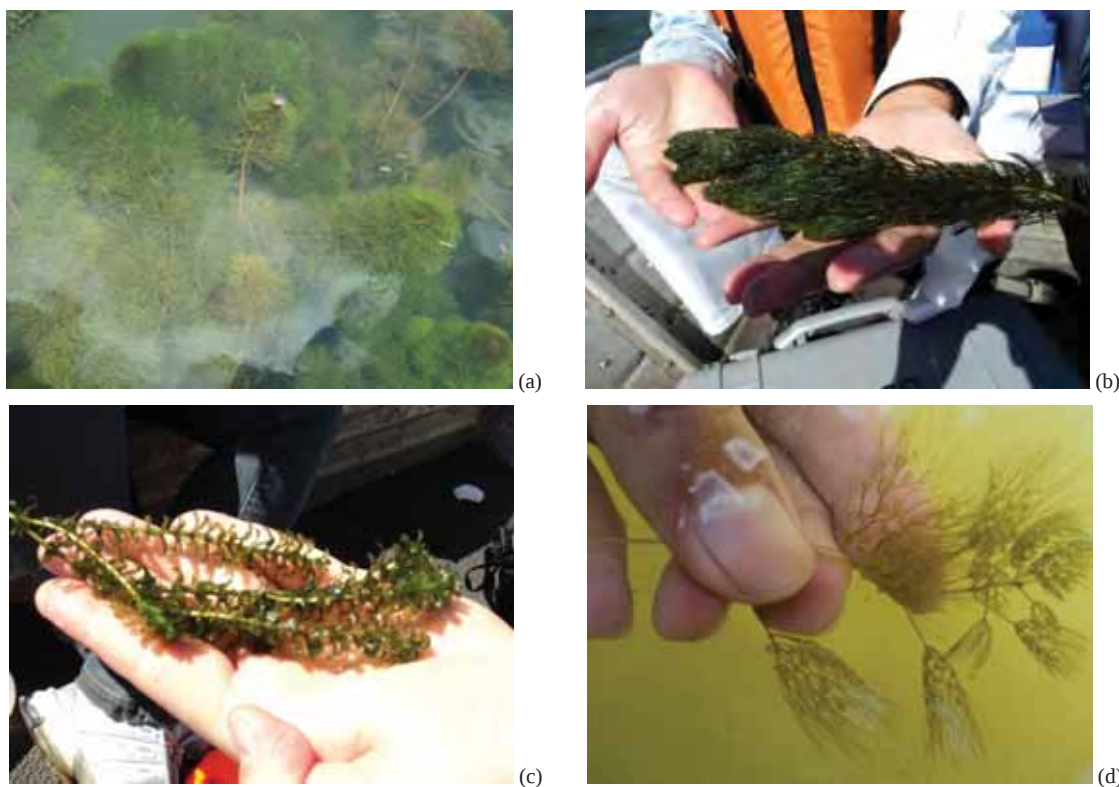


Figura 31 – Vegetação aquática submersa. (a) *Cabomba sp.*, (b) *Ceratophyllum demersum*, (c) *Egeria najas* e (d) *Chara sp.*

O córrego Ferreira é uma região do reservatório muito propensa ao desenvolvimento de plantas aquáticas submersas, com alta variabilidade de espécie e alto nível de colonização. Esse foi um fator muito importante para seleção de uma área de estudos nesse córrego. Assim, na quarta campanha de levantamento de campo, realizado no período de 27 a 29 de setembro de 2011, a coleta dos dados foi adquirida neste local. Neste levantamento de campo, foi encontrada em todo o córrego Ferreira apenas a espécie de vegetação aquática submersa, *Ceratophyllum demersum*, conhecida comercialmente como Rabo de Raposa. Essa espécie apresenta alta variabilidade de altura e cobertura dentro de uma pequena área. Por esta razão, qualquer movimentação da embarcação interfere sobre os dados radiométricos coletados.

Nesse período, a área de estudo estava infestada por macrófitas imersas, sem que esta, no entanto, tivesse atingido sua capacidade suporte, ou seja, situação em que verticalmente as plantas rompem o limite da superfície da água. A Figura 32 mostra a situação do reservatório em outubro de 2010, em que a (a) *Ceratophyllum demersum* havia atingido sua capacidade suporte e (b) a condição de infestação observada no quarto levantamento de campo, em setembro de 2011.



Figura 32 – Infestação por *Ceratophyllum demersum* no córrego Ferreira, (a) em Out/2010, quando a planta atingiu sua capacidade suporte, e (b) Set/2011

Diferente de espécies como a *Egeria najas* e a *Cabomba sp.* que tomam toda a superfície da água ao atingir a capacidade suporte, a *Ceratophyllum demersum*, por apresentar uma estrutura mais rígida, neste estágio de desenvolvimento passa a emergir apenas a extremidade de sua estrutura foliar (Figura 32a).

Tanto em outubro de 2010 quanto em setembro de 2011, foi verificada a presença de perifíton sobre a *Ceratophyllum demersum*. O perifíton é formado por algas, bactérias e detritos que se depositam em rochas e em macrófitas submersas, em condições de águas que

apresentam baixa interferência pelo vento. Essa situação pôde ser observada no levantamento de campo feito em setembro de 2011, como mostra a Figura 33a, em que a *Ceratophyllum demersum* está totalmente tomada pelo perifíton. Condição semelhante foi encontrada no ano anterior (Figura 33b), no campo de outubro de 2010. Desse modo, no quarto levantamento de campo, as coletas dos dados limnológicos, ecobatimétricos e radiométricos foram realizadas em condições de alto desenvolvimento de plantas aquáticas submersas e presença de perifíton.



Figura 33 – (a) *Ceratophyllum demersum* encoberta totalmente por perifíton (Set/ 2011); (b) perifíton (Out/2010)

Nessa etapa de campo, as condições meteorológicas estavam propícias à coleta dos dados radiométricos (em termos de nebulosidade). Entretanto, havia uma leve brisa que provocava pequenas ondulações na água. Por este motivo, a coleta dos dados espectrorradiométricos foi sempre tomada do lado do barco onde havia menor interferência das ondas. O vento promove a movimentação de parte da coluna d'água, conhecida como zona *fetch*, formando ondulações na superfície da água. Tais ondulações aumentam a reflexão especular, fazendo com que boa parte da radiação não penetre e interaja com a coluna d'água e, conseqüentemente, retorne para a atmosfera por retroespalhamento.

4.2 PRIMEIRA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO – DADOS DE REFLECTÂNCIA

Das 20 amostras de reflectância coletadas foi detectado de ruído em todas. Dentre os fatores que podem ter gerado os ruídos, destaca-se a ondulação da água provocada pela ação do vento, observada nos dias de amostragem. Foram testados filtros com diferentes tamanhos de janela de amostragem, sendo que o filtro de 7 pontos removeu satisfatoriamente os ruídos e não suavizando de forma exagerada as feições espectrais.

A partir das curvas de reflectância obtidas com a filtragem, foi aplicada a análise de agrupamento, cujas 6 classes geradas, com nível de similaridade 95, são apresentadas na Figura 34. A tabela logo abaixo do dendrograma apresenta os identificadores de cada uma das observações com o nome da amostra e a altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação, nos casos em que há plantas. Em termos de presença e ausência de vegetação aquática submersa, verificou-se confusão entre os elementos agrupados em um mesmo *cluster*, mostrando que o classificador não foi capaz de distinguir diferenças espectrais sutis entre as curvas.

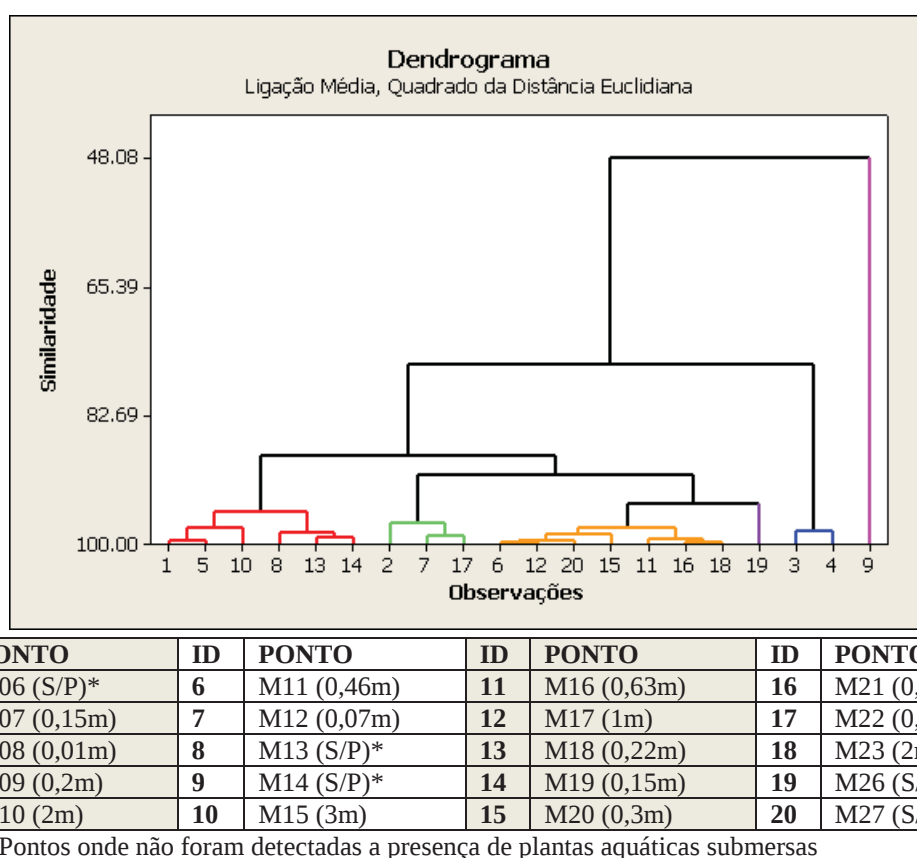


Figura 34 – Análise de agrupamento – curvas de reflectância usadas como dados de entrada

Houve uma alta confusão na separação das curvas de reflectância, tendo sido agrupados espectros cuja vegetação aquática submersa encontrava-se próxima à superfície e curvas amostradas em pontos sem macrófitas. Um exemplo desse tipo de agrupamento é o 1 (Figura 35a), que uniu curvas como a M19 com macrófitas a 0,15 m e M06 que não apresenta plantas submersas. A Figura 35 apresenta as curvas de reflectância espectral separadas em classes segundo a análise de agrupamento da Figura 34.

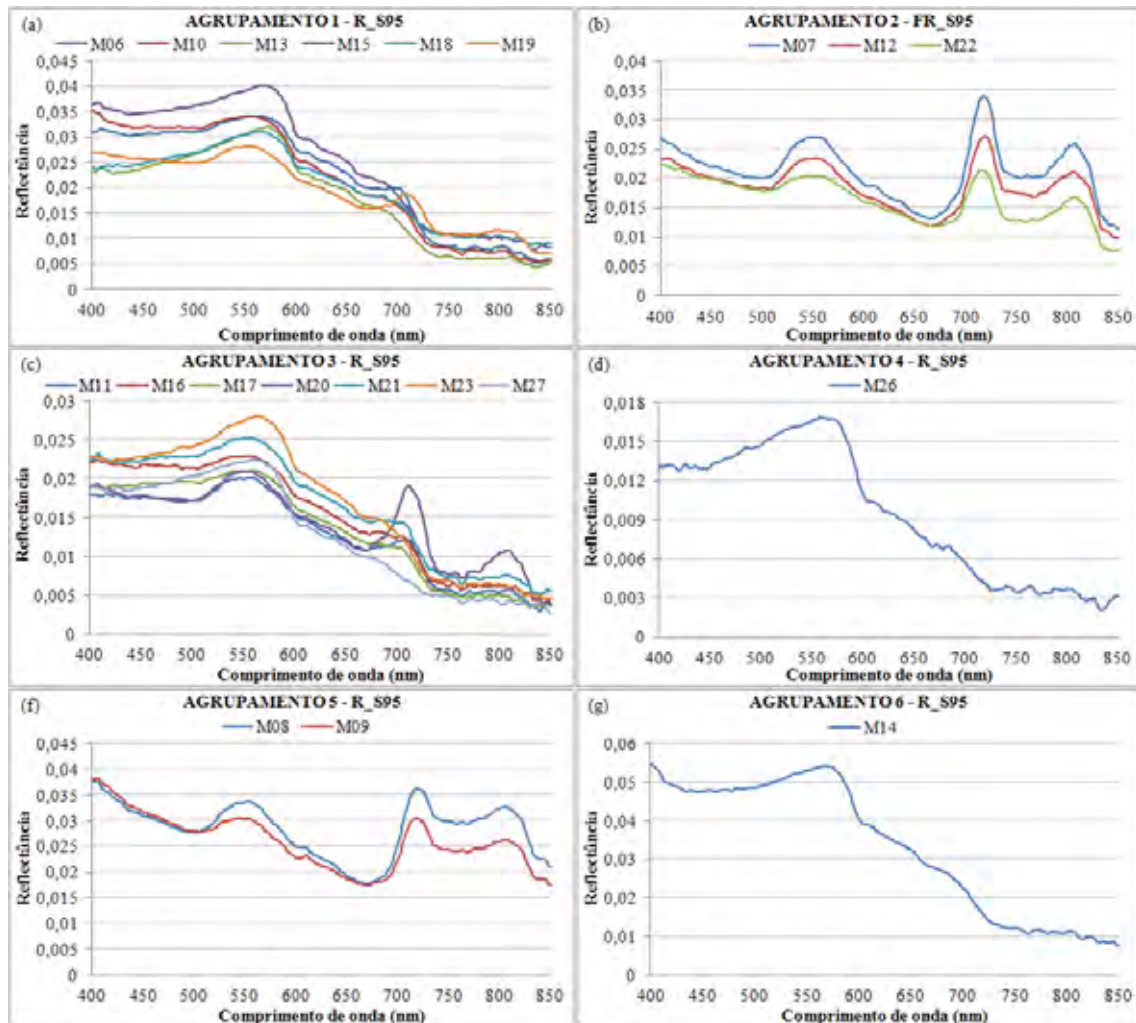


Figura 35 – Curvas de reflectância – classificação por análise de agrupamento usando dados de reflectância

O agrupamento 2 apresentou resultado satisfatório, tendo agrupado curvas semelhantes em termos de forma e altura de coluna d'água sobre o dossel das plantas aquáticas submersas, que varia de 0,05 – 0,15 m (profundidades consideradas próximas à superfície da água). Essas curvas apresentam dois picos na região do infravermelho próximo, sendo um em torno do comprimento de onda de 720 nm e o outro em 807 nm. Essas duas feições são características de presença de vegetação aquática submersa. A posição da primeira feição de reflectância, mais proeminente que a segunda, indica presença de coluna d'água já de alguns centímetros sobre o dossel (HAN e RUNDQUIST, 2003). Em outros casos, a maior reflectância do primeiro pico pode estar relacionada com a densidade de plantas que pode estar de média para baixa (YUAN e ZHANG, 2008). De acordo com Rundquist *et al.* (1996), pequenas feições de reflectância em torno do comprimento de onda de 810 também podem estar relacionadas com o retroespalhamento da matéria-orgânica (células algais).

Ainda ao analisar as curvas M07, M12 e M22 (agrupamento 2) com suas respectivas alturas sobre o dossel (0,15 m, 0,07 m e 0,05), verifica-se que o pico de reflectância em 720 nm é maior para o ponto de maior altura de coluna de água sobre o dossel, enquanto esperava-se que esse pico fosse maior para as curvas com plantas mais próximas à superfície. Essa característica pode estar associada à intensidade de radiação disponível no momento de tomada das medidas.

No entanto, ao analisar o primeiro e o segundo pico do infravermelho, verifica-se que a diferença entre eles decresce conforme a altura de coluna d'água sobre o dossel diminui independente do valor de reflectância. Esse padrão no comportamento espectral é consistente nas curvas, pois quanto mais próximo à vegetação da superfície, menor o espalhamento volumétrico e maior o pico em aproximadamente 810 nm, comprimento de onda altamente absorvido pela água. Assim, apesar de ser mais sensível a presença da vegetação aquática submersa fora da água, com uma reflectância maior do que em 720 nm, poucos milímetros de coluna d'água são suficientes para que a reflectância em 810 seja muito reduzida.

Além do infravermelho próximo, são verificadas outras regiões do espectro sensíveis à presença da vegetação aquática submersa. Nota-se que a reflectância na região do verde (ponto de máxima reflectância no visível em aproximadamente em 550 nm) decresce nos pontos em que a planta se encontra mais próxima a superfície. Segundo Han e Rundquist (2003), o decréscimo da reflectância nessa região ocorre devido à diminuição da espessura coluna d'água que contribui para um menor espalhamento volumétrico desses comprimentos de onda.

Ao analisar o terceiro agrupamento, verifica-se ainda mais confusão entre as curvas com e sem plantas aquáticas submersas. A curva do ponto M27 que não apresenta macrófitas submersas, coletada em um ponto com profundidade de 20 m, foi agrupada ao mesmo grupo do ponto M20 que apresentava uma altura de coluna d'água sobre o dossel de aproximadamente 30 cm. Os demais pontos que pertencem a esse agrupamento apresentavam vegetação aquática submersa, com grande gradiente de altura de coluna d'água, variando de 0,3 – 2 m. Nota-se que os pontos M11, M20 e M21 que possuíam altura de coluna d'água sobre o dossel de 0,46m, 0,3m e 0,5m, respectivamente, apresentaram comportamento diferenciado das demais curvas desse grupo, com o primeiro pico no infravermelho próximo bem definido, associado à presença de plantas aquáticas submersas.

Entretanto, analisando o ponto M17 que apresentou uma altura de coluna d'água sobre o dossel de 0,05m (a menor das alturas do agrupamento 3), verificou-se baixa reflectância nos comprimentos relacionados a presença de plantas, com um discreto pico de

reflectância próximo a 700 nm, feição também associada a clorofila algal (GITELSON, 1992). Esse comportamento espectral inesperado pode estar relacionado à baixa densidade da *Ceratophyllum demersum*, no ponto amostrado (YUAN e ZHANG, 2008).

Em relação ao quarto agrupamento (Figura 35d), esperava-se que o ponto M26 fosse agrupado a curva M27, devido a semelhanças do local amostrado, com ausência de macrófitas submersas e maior profundidade, de 15 e 20 metros, respectivamente. O mesmo ocorreu a curva do ponto M14 (Figura 35f), do agrupamento 6, adquirida em condições similares à medida M13, sem plantas e com uma coluna d'água de aproximadamente 6m de profundidade. Por outro lado, o agrupamento 5 (Figura 35e) apresentou bom resultado, agrupando curvas de reflectância similares, com altura de coluna de no máximo 20 centímetros.

4.3 SEGUNDA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO – PARÂMETROS DE BANDA DO CONTÍNUO REMOVIDO

Para tentar reduzir o erro de agrupamento entre as observações foram testadas outras variáveis além da reflectância espectral. Inicialmente, testou-se os espectros de primeira e segunda derivada da reflectância como dados de entrada, mas não foram obtidos bons resultados, gerando ainda mais confusão do que a classificação adotando as curvas de reflectância espectral. Outro conjunto de dados utilizados como variável na análise de agrupamento foram os parâmetros de banda obtidos com a técnica de remoção do contínuo espectral. O intuito de utilizar esses parâmetros de banda foi considerar a forma do espectro de reflectância na classificação não-supervisionada.

A princípio, pretendia-se aplicar a remoção do contínuo nos intervalos de comprimento de onda de 560 – 700 nm, e 700 – 810 nm, onde são observados grandes feições de absorção. No entanto, a ausência de plantas ou, mesmo, a variação da altura de coluna d'água sobre a vegetação provoca alterações na forma das curvas, como o deslocamento de picos de reflectância. Por esse motivo, foram testadas variações de banda dentro desses intervalos, para se obter uma função linear que se ajustasse a todas as curvas de reflectância. A Figura 36 mostra 2 espectros de contínuo removido, para os intervalos 585 – 685 nm (a) e 727 – 793 nm (b).

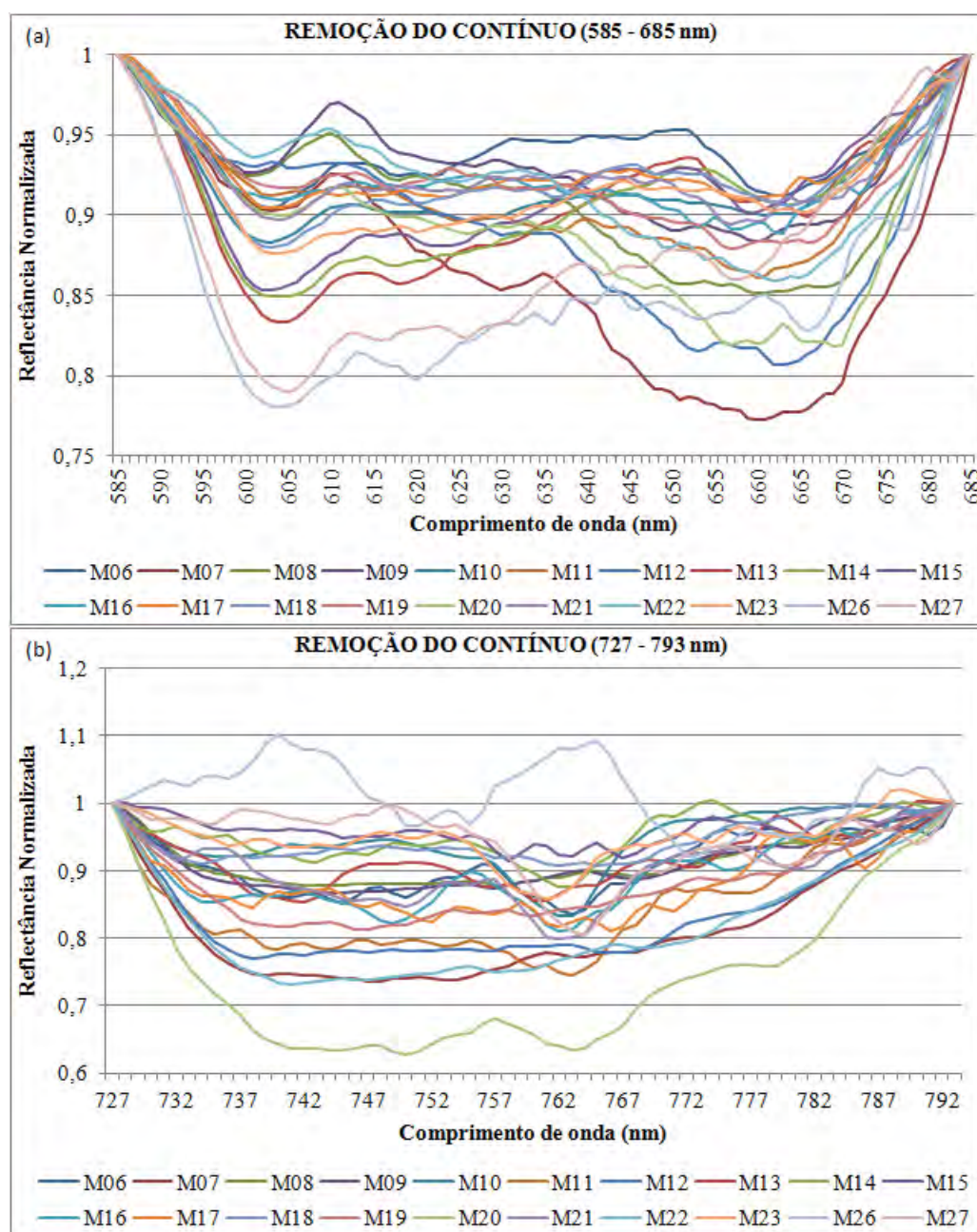


Figura 36 – Contínuo removido dos intervalos (a) 585 – 685 nm e (b) 727 – 793 nm

No intervalo do infravermelho próximo, não foi possível gerar uma função comum que se ajustasse a todas as curvas. Ao analisar a Figura 36b, nota-se que as curvas que apresentaram valores de reflectância normalizada maiores que 1 foram aquelas que não apresentam plantas aquáticas submersas, como as curvas M13, M14 e M26, ou possuem uma altura de coluna d'água sobre o dossel grande, como o ponto M23. Isso ocorre quando o valor do fator de remoção do contínuo calculado é menor do que o valor de reflectância original. Se as curvas M10, M15 e M27 também tivessem apresentado valores de fator de remoção do contínuo superiores a 1, assim como as curvas M13, M14, M23 e M26 (que apresentam características similares a elas), seria possível afirmar que a aplicação da remoção do contínuo

espectral no intervalo de 727 – 793 nm é capaz de separar as curvas com plantas próximas à superfície daquelas sem vegetação aquática submersa ou que apresentam altura de coluna d'água sobre o dossel superior a 2m. Dessa forma, seria possível utilizar esse intervalo de comprimento de onda e aplicar remoção do contínuo espectral para identificar curvas em que as plantas estão próximas à superfície.

Por fim, dentre os comprimentos de onda testados, verificou-se que o intervalo de onda de 585 – 685 nm foi capaz de ajustar uma única função, em relação ao comprimento de onda, para as curvas de reflectância de todos os pontos amostrais. Essa região do espectro compreende o final do verde, o amarelo e o vermelho. A Tabela 7 mostra os parâmetros de banda para esse intervalo de comprimento de onda.

Tabela 7 – Parâmetros de banda para o intervalo 585 – 686 nm

ID	Amostra	ACD* (m)	Altura	Posição	Meia altura	Largura	Assimetria	Área
1	M06	S/P**	0,0958706	603	0,0479353	58	0,747763742	5,92278967
2	M07	0,15	0,22711304	660	0,11355652	60	-0,355189886	13,34687806
3	M08	0,01	0,148329482	661	0,074164741	62	-0,397001629	8,910307256
4	M09	0,2	0,116644006	660	0,058322003	61	-0,423649192	7,009388722
5	M10	2	0,117020568	603	0,058510284	81	0,795003658	8,200872993
6	M11	0,46	0,138955532	660	0,069477766	78	-0,499399721	8,801698572
7	M12	0,07	0,192854207	663	0,096427103	56	-0,466132633	10,76929438
8	M13	S/P**	0,166913376	604	0,083456688	48	0,688733744	9,257249475
9	M14	S/P**	0,150447241	604	0,075223621	55	0,703207997	9,08286413
10	M15	3	0,147100043	603	0,073550021	48	0,740581609	8,426913431
11	M16	0,63	0,11165982	663	0,05582991	82	-0,638241495	7,48805318
12	M17	1	0,095754369	603	0,047877185	82	0,869370908	6,989712285
13	M18	0,22	0,119907776	603	0,059953888	82	0,779454389	7,665010763
14	M19	0,15	0,120696475	657	0,060348238	81	-0,330987368	7,866159572
15	M20	0,3	0,182095927	669	0,091047963	64	-0,745512969	10,90225567
16	M21	0,5	0,105653292	657	0,052826646	83	-0,429838036	7,385525007
17	M22	0,05	0,141392206	662	0,070696103	60	-0,418745105	7,859290594
18	M23	2	0,123840613	603	0,061920307	80	0,820867786	8,265942463
19	M26	S/P**	0,219529565	604	0,109764783	80	0,740134792	14,93979788
20	M27	S/P**	0,209998547	605	0,104999274	72	0,640933606	12,48474972

* ACD – Altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa

** S/P – Amostra sem presença de vegetação aquática submersa

Os parâmetros de banda obtidos para o intervalo de 585 – 685 nm foram utilizados na classificação por análise de agrupamento. O dendograma apresentado na Figura 37 mostra as classes geradas com a análise de agrupamento.

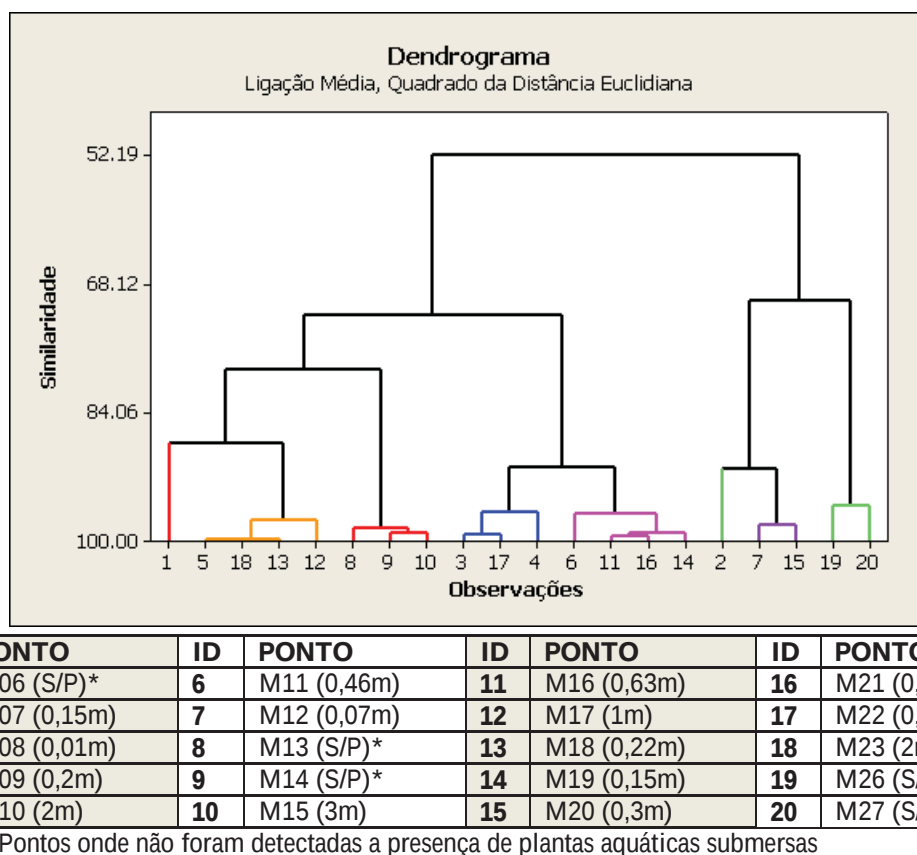


Figura 37 – Dendrograma da análise de agrupamento usando parâmetros de banda do intervalo espectral 585 – 685 nm

Foram criados 8 agrupamentos (Figura 38), 2 a mais do que quando aplicada a análise sobre as curvas de reflectância, adotando o mesmo nível de similaridade, de 95. Nota-se um reagrupamento de muitas curvas, como o exemplo dos pontos M06 (local raso sem vegetação aquática submersa) e M07 (altura de coluna d'água sobre o dossel de 15 cm) que formam grupos isolados (Figura 38a e 38b). O ponto M06 não se assemelha a nenhum dos outros ambientes em termos de presença de planta e profundidade da coluna d'água, por essa razão sua separação das demais curvas é consistente. Entretanto, a curva M07 que se assemelha a outras curvas como a M12 e M20, em relação à forma, também ficou isolada.

O terceiro agrupamento apresenta resultado satisfatório, contendo curvas cujas alturas da coluna d'água sobre o dossel não ultrapassam 20 cm (Figura 38c). Por outro lado, o quarto grupo é formado por pontos que apresentam alturas de coluna d'água entre 1 – 2m, com exceção do ponto M18 que possui 0,22 m. A baixa resposta espectral da vegetação aquática submersa nesse ponto pode estar associada à baixa densidade de plantas no local, uma vez que plantas com dossel a uma profundidade máxima de 0,3 m da superfície possuem influência nítida sobre a reflectância, como mostra a curva M20 (Figura 38f).

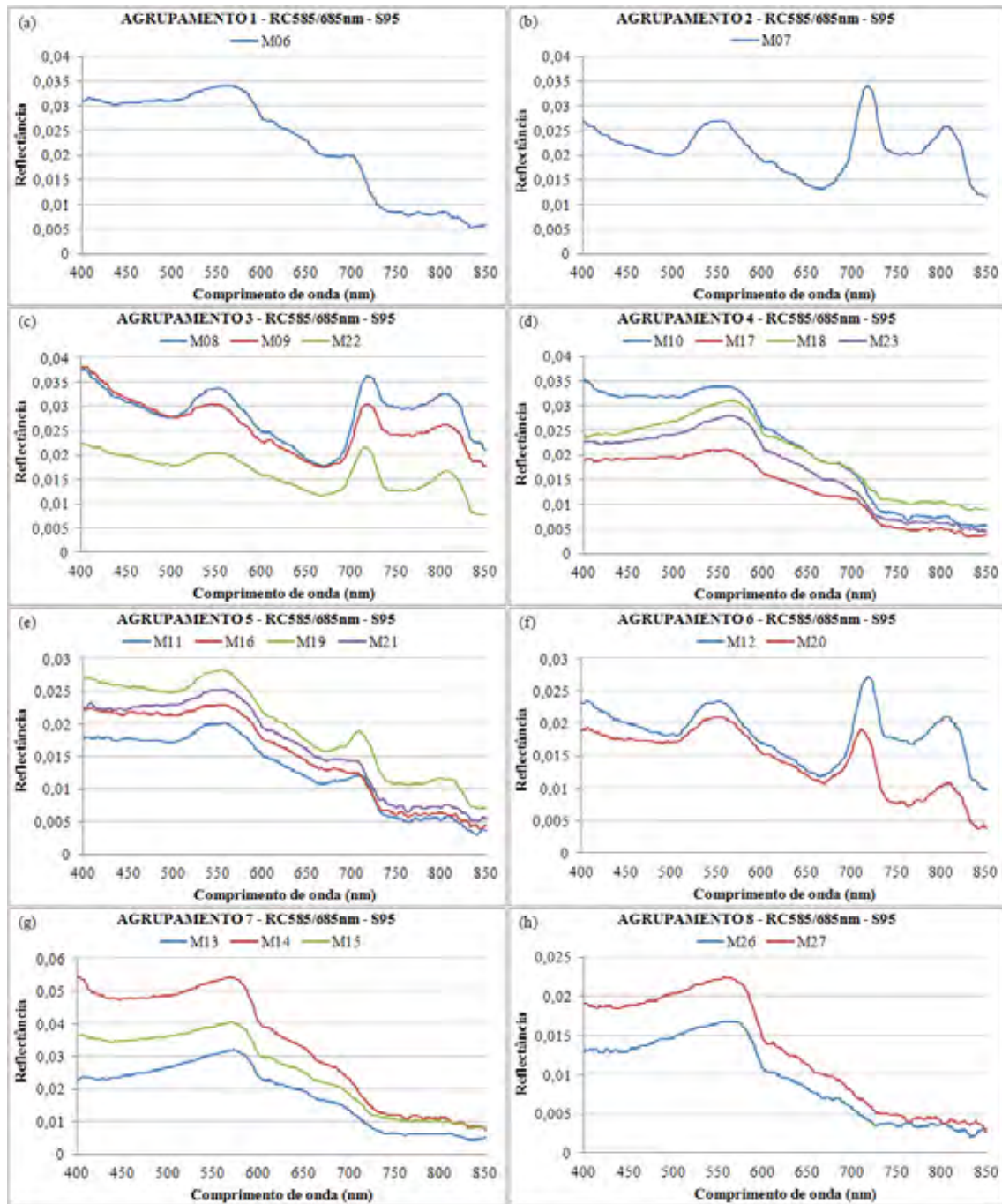


Figura 38 – Curvas de reflectância – classificação usando como dados de entrada os parâmetros de banda do contínuo removido no intervalo 585 – 685 nm

O agrupamento 5 é composto por curvas cujas alturas de coluna d'água sobre o dossel variam de 0,15 – 0,63 m. Não fosse a presença do ponto M19 (0,15 cm), este agrupamento poderia ser classificado como contendo pontos com altura de coluna d'água próximas a 0,5 m. O grupo 6 também apresenta diferença considerável entre as duas curvas que o compõe, M12 e M20, devido a altura da coluna d'água sobre do dossel serem bem distintas. Uma diferença visível entre elas são as reflexões em 550 nm e 720 nm. Enquanto em M12 (0,07 m) a reflectância no infravermelho próximo é maior do que no visível, o

inverso é observado em M20, ponto em que profundidade até o dossel das macrófitas submersas é de 0,30 m. No entanto, em termos de forma, elas são bem similares, na região do infravermelho.

No agrupamento 7 é possível ver confusão na classificação em relação a pontos que não apresentam vegetação aquática submersa com uma profundidade de coluna d'água de 6 m (M13 e M14) e que possuem plantas (M15) com uma altura de coluna d'água de aproximadamente 3 m. Ao analisar a Figura 38g verifica-se que a resposta espectral das macrófitas submersas, na região do infravermelho, foi bem atenuada pela coluna d'água. Assim, verifica-se que estando o dossel da vegetação a uma profundidade igual ou superior a 3 m, a resposta adquirida não é distinguida de áreas sem plantas aquáticas submersas, com mesma profundidade de coluna d'água, pelo algoritmo de agrupamento, adotando os parâmetros de remoção de contínuo como variáveis.

Entretanto, pontos sem plantas, mas com uma coluna d'água mais profunda, são distinguidos dos demais, como os pontos M26 e M27 (com 15 e 20 metros, respectivamente). Em águas mais profundas, a radiação registrada tem baixa contribuição da reflectância de fundo, diminuindo a energia em todo o espectro. Esse comportamento pode ser verificado comparando as curvas M14 e M27, que não apresentam plantas aquáticas submersas, mas possuem grande diferença em relação à profundidade da coluna d'água.

Ao analisar o resultado geral do desempenho da análise de agrupamento na classificação das curvas espectrais utilizando os parâmetros de banda obtidos com o contínuo removido verifica-se que se obteve um resultado razoável. Essa abordagem, no entanto, não conseguiu distinguir de forma adequada a resposta espectral de pontos em que não há plantas aquáticas submersas, em locais não profundos, de pontos que apresentam a vegetação aquática submersa, a partir de uma altura de coluna d'água de 3 m.

4.3.1 Derivada de primeira ordem – classificação por análise de agrupamento utilizando parâmetros de banda do contínuo removido

Sobre as curvas de reflectância espectral foi aplicada a primeira derivada a fim de realçar feições associadas às plantas imersas. Os espectros de primeira derivada foram separados de acordo com as classes geradas com a análise de agrupamento usando os parâmetros de banda obtidos com o contínuo removido, como mostra a Figura 39.

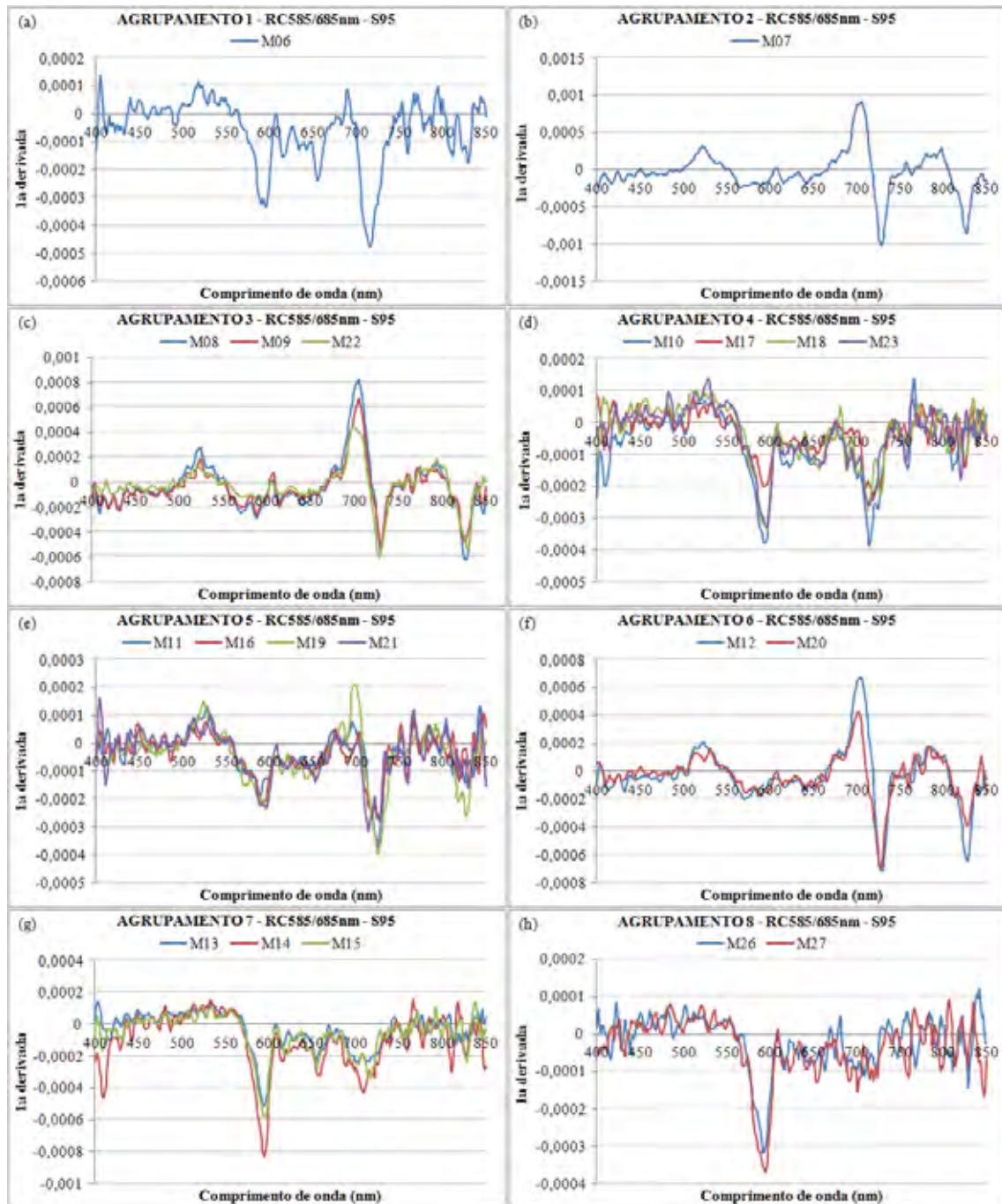


Figura 39 – Curvas de 1ª derivada da refletância – classificação usando como dados de entrada os parâmetros de banda obtidos do contínuo removido no intervalo 585 – 685 nm

É possível verificar nas curvas de primeira derivada dos pontos em que as plantas aquáticas submersas se encontram mais próximas a superfície que três picos são bem definidos nas regiões do *red edge* e do infravermelho próximo: um pico positivo em aproximadamente 700 nm, outro negativo em 720 nm, este último associado à turbidez e a presença de clorofila algal (GOODIN *et al.*, 1993), e mais um negativo por volta de 825 nm (Figuras 39b, 39c, 39e e 39f). Nessas curvas verifica-se, também, um pico positivo próximo a

530 nm (luz verde). Segundo Han (2002), a feição em 700 nm está associada à presença da vegetação aquática submersa.

Por outro lado, quanto maior a contribuição da resposta da vegetação aquática submersa menor o pico negativo 595 nm, como pode ser observado na Figura 39b (HAN, 2002). O oposto também é detectado: quanto maior a altura da coluna d'água sobre o dossel das macrófitas, maior o pico negativo em 595 nm (Figuras 39d e 39e). Para as curvas sem plantas submersas, esse pico mínimo é bem definido, como pode ser visto nos agrupamentos 7 (Figura 39g) e 8 (Figura 39h).

Nota-se que somente em águas profundas sem vegetação aquática submersa (Figura 39h) não há o pico negativo em 720 nm, associado à turbidez (GOODIN *et al.*, 1993), enquanto que no ponto M06 (Figura 39a), raso e sem plantas também, esse pico é acentuado. Esse comportamento de decréscimo do pico negativo em 720 nm é associado às macrófitas submersas, segundo Han (2002). No entanto, visto que ambos os grupos apresentam qualidade da água semelhante (baixíssima turbidez, que varia de 1,2 – 1,98 NTU) e não apresentam plantas, é provável que essa diferença em 720 nm esteja associada à reflectância de fundo em M06.

Em curvas com presença de vegetação aquática submersa observa-se um pico positivo ao redor de 530 nm, referente ao verde. Esta feição pode estar relacionada com a reflectância da planta nesse comprimento de onda, já que as curvas do agrupamento 7 e 8, que não possuem contribuição da resposta da vegetação, não apresentam essa feição (Figura 39g e 39h). Em termos de intensidade, esta feição aumenta de acordo com a maior proximidade das macrófitas submersas à superfície da água. No entanto, em comparação com ao pico positivo em 700 nm, o pico em 530 nm parece diminuir.

Embora o pico positivo ao redor de 700 nm seja uma feição que representa a presença das macrófitas submersas, a atenuação pela água nos comprimentos de onda do infravermelho dificulta a identificação das plantas a partir dessa região do espectro quando a vegetação se encontra a profundidades superiores a 50 cm.

O pico negativo em aproximadamente 825 nm é bem definido nas curvas em que as plantas aquáticas submersas se encontram mais próximas à superfície da água (Figura 39b, 39c e 39f). As curvas das Figuras 39d e 39e que possuem macrófitas submersas apresentam essa feição bem visível. Esse pico pode estar associado à mudança de forma devido à feição de espalhamento nessa região nas curvas de reflectância, associada à reflectância da macrófita submersa (HAN e RUNDQUIST, 2003) ou ao retroespalhamento da matéria-orgânica (RUNDQUIST *et al.*, 1996).

4.3.2 Derivada de segunda ordem – classificação por análise de agrupamento utilizando parâmetros de banda do contínuo removido

Ao analisar a derivada de 2ª ordem da reflectância (Figura 40), observam-se algumas feições que podem estar associadas à presença de vegetação aquática submersa. Na região do infravermelho próximo verifica-se a presença de três feições bem definidas que são observadas apenas nas curvas em que se verificou a presença de macrófitas imersas, como nos agrupamentos 2, 3 e 6. Duas dessas feições são positivas, sendo uma em torno de 700 nm e a outra por volta de 735 nm. Já o pico negativo encontra-se próximo a 720 nm. Nas regiões com ausência das macrófitas submersas, como nos agrupamentos 7 e 8, essas feições não existem, sendo uma região muito ruidosa.

Nos agrupamentos 7 e 8 (Figura 40g e 40h), caracterizada pela ausência de plantas aquáticas submersas, com exceção do ponto M15, destaca-se duas feições, ambas localizadas na região espectral do amarelo, sendo um pico negativo por volta de 586 nm e outro positivo ao redor de 600 nm.

Nas curvas dos agrupamentos 4 e 5 (Figuras 40d e 40e), em que a presença ou ausência da vegetação aquática submersa não é tão facilmente perceptível, verifica-se feições espectrais tanto na região da luz amarela (características de locais com ausência de macrófitas submersas) quanto no infravermelho próximo (associado a presença de plantas aquáticas submersas). Nota-se também a presença dessas feições no agrupamento 1 (ponto M06), caracterizado por um local de coluna d'água rasa (aproximadamente 1 m) e sem vegetação aquática submersa. É provável que, neste ponto, as feições na região do infravermelho próximo estejam associadas à reflectância do substrato.

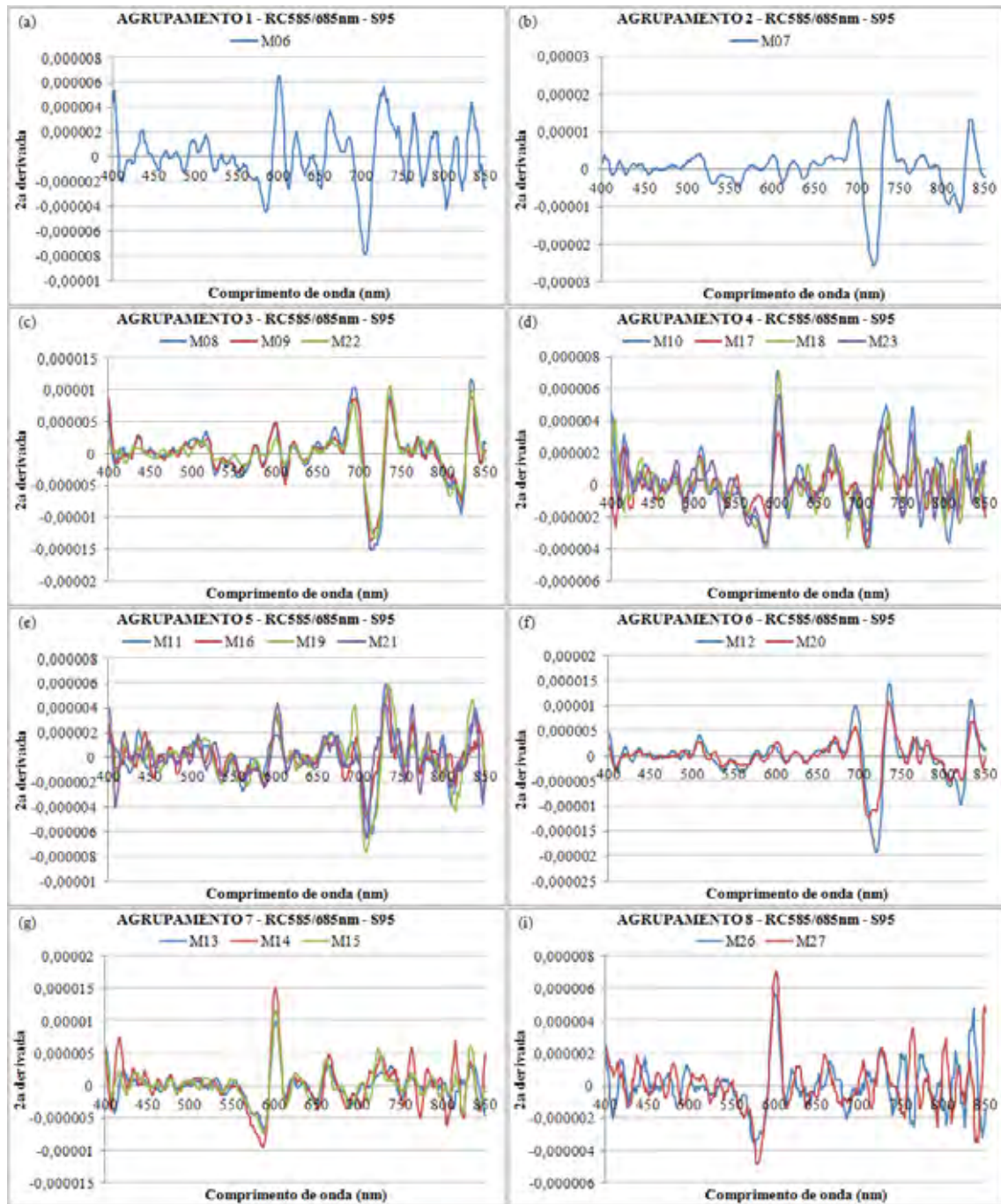


Figura 40 – Curvas de 2ª derivada da reflectância – classificação usando como dados de entrada os parâmetros de banda obtidos do contínuo removido no intervalo 585 – 685 nm

4.4 CLASSIFICAÇÃO POR MAPEAMENTO POR ÂNGULO ESPECTRAL

Analisado o desempenho da classificação por análise de agrupamento utilizando os parâmetros de banda obtidos com o contínuo removido, optou-se por testar uma abordagem de classificação supervisionada das curvas espectrais que considerasse a forma do espectro. Dessa forma, foi aplicada a classificação por mapeamento do ângulo espectral (SAM –

Spectral Angle Mapper). Por se tratar de uma abordagem supervisionada foram selecionados espectros de referência.

O critério de seleção dessas curvas de referência foi baseado nas características de ausência e presença de plantas aquáticas submersas, bem como na altura da coluna d'água sobre o dossel quando há vegetação. Foram escolhidos três pontos sem macrófitas submersas, mas com diferentes profundidades de coluna d'água: M06 (1m), M14 (6m) e M27 (20m). Os demais espectros foram selecionados com base na altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação submersa, variando de poucos centímetros (M12) a 2 m (M23).

Foi definido o limite de 2m de altura de coluna d'água sobre o dossel para os espectros de referência, de modo a verificar se o ponto M15 (altura de coluna d'água sobre o dossel de 3m) seria classificado como sem ou com planta, visto que fora agrupado como sem macrófitas submersas pela análise de agrupamento. Por fim, as curvas selecionadas como amostras de referência da classificação foram M06, M09, M12, M14, M16, M19, M23 e M27.

Nesta classificação foram testados diferentes intervalos de comprimento de onda das curvas de reflectância espectral. Analisando os resultados, foi verificado que o intervalo de 585 – 685 nm gerou as classes mais coerentes.

O resultado da aplicação dessa técnica é apresentado na Tabela 9 que mostra os ângulos entre as curvas testadas e as curvas de referência. Ao lado do nome das curvas é informado entre parênteses o valor da altura de coluna d'água sobre a vegetação aquática submersa ou, na ausência da planta, a profundidade da coluna d'água.

Ao observar a Tabela 8, verifica-se que na primeira linha são apresentadas as curvas de reflectância utilizadas como referência da classificação e na primeira coluna estão às curvas a serem testadas. Entre parênteses é apresentado o valor de altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação. Ao analisar a Tabela 8, verifica-se que os valores destacados em negrito correspondem aos menores ângulos entre o vetor de uma curva de reflectância testada em relação ao vetor de uma curva de referência, representando maior similaridade. Assim, um espectro será classificado à curva de referência a qual apresentar o menor ângulo.

A Figura 41 apresenta as curvas de reflectância separadas de acordo com os grupos obtidos com a aplicação do SAM. Ao comparar a classificação supervisionada em relação a não-supervisionada, em termos da forma das curvas, verifica-se que o SAM apresenta melhor resultado.

Como resultado da classificação, foi obtida uma classe composta apenas pela curva M06 que corresponde à única medida de reflectância tomada em um ponto sem plantas aquáticas submersas e localizado em uma área de coluna d'água rasa, de aproximadamente 1

m de profundidade. A segunda classe gerada é formada pelas curvas M09 e M22, caracterizadas pela presença de vegetação aquática submersa próxima à superfície, com altura de coluna d'água sobre o dossel de 0,2 m e 0,05 m, respectivamente. O terceiro agrupamento contém as curvas de reflectância M07, M08, M12 e M20. Todas as curvas dessa classe foram tomadas em pontos com plantas aquáticas submersas, mas apresentam uma variação considerável da altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação, de 0,07 m a 0,3 m.

Tabela 8 – Classificação por Mapeamento do Ângulo Espectral (SAM)

T \ R	M06 (1m)*	M09 (0,2m)	M12 (0,07m)	M14 (6m)*	M16 (0,63m)	M19 (0,15m)	M23 (2m)	M27 (20m)*
M07 (0,15m)	0,0428	0,0387	0,0122	0,0583	0,0318	0,031	0,0458	0,0752
M08 (0,01m)	0,0263	0,0265	0,014	0,0523	0,0176	0,0157	0,0377	0,0756
M10 (2m)	0,0166	0,0433	0,0355	0,0267	0,0168	0,0186	0,0127	0,0531
M11 (0,63m)	0,023	0,0326	0,0194	0,0427	0,0125	0,0128	0,0282	0,0658
M13 (6m)*	0,0399	0,0717	0,0614	0,0071	0,0447	0,0466	0,019	0,0298
M15 (3m)	0,0253	0,0561	0,0492	0,0161	0,0299	0,032	0,0109	0,0432
M17 (1m)	0,0126	0,0383	0,0337	0,0326	0,0118	0,0135	0,0181	0,0598
M18 (0,22m)	0,0168	0,0303	0,0385	0,0455	0,0167	0,018	0,0333	0,0729
M20 (0,3m)	0,0281	0,0325	0,0143	0,0489	0,0186	0,0178	0,0349	0,0702
M21 (0,5m)	0,0131	0,0277	0,0305	0,0438	0,0085	0,0094	0,0297	0,0703
M22 (0,05m)	0,0284	0,0145	0,0193	0,0601	0,0195	0,0174	0,0453	0,0851
M26 (15m)	0,0785	0,1077	0,0905	0,0431	0,0809	0,0827	0,0557	0,0193

* Profundidade da coluna d'água em locais sem vegetação aquática submersa.

Ao contrário da análise de agrupamento, o SAM conseguiu separar em um grupo as curvas de reflectância tomadas em pontos sem macrófitas submersas e que apresentam uma coluna d'água de 6 m de profundidade (pontos M13 e M14) (Figura 41d). Na análise de agrupamento a curva M15 foi classificada junto a essas curvas, pois apresenta uma altura de coluna d'água sobre o dossel grande, de aproximadamente 3 m, que atenua muito a radiação, apresentando uma curva parecida daquelas sem plantas.

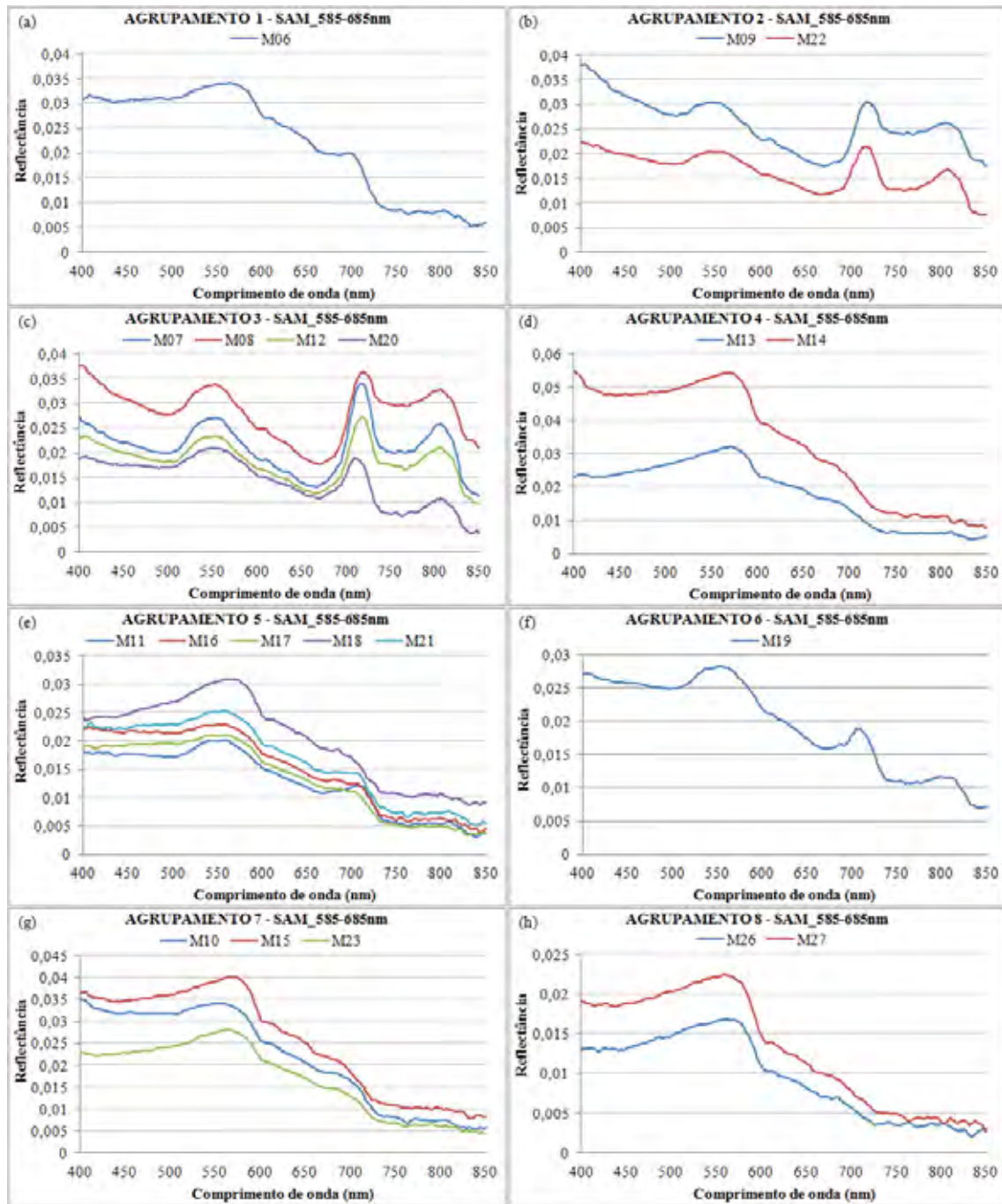


Figura 41 – Classificação das curvas de reflectância segundo a classificação pelo SAM

Outra classe formada é constituída pelas curvas M11, M16, M17, M18 e M21, que apresenta uma grande variação de altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa entre as curvas, de 0,22m a 1m (Figura 41e).

Em outras técnicas de classificação, a curva de reflectância M19 havia sido agrupada a outras curvas não semelhantes a ela. Por este motivo, este espectro foi adotado como referência com o objetivo de verificar a existência de curvas realmente semelhantes a ele. Aplicando o SAM, foi confirmado que nenhuma das curvas testadas apresentou maior similaridade com M19 (Figura 41f).

Outro resultado positivo obtido a partir do mapeamento por ângulo espectral pode ser visto no sétimo grupo formado pelas curvas de reflectância M10, M15 e M23 que são caracterizadas por ambientes com vegetação aquática submersa, mas não visível, com altura de coluna d'água sobre o dossel das plantas variando de 2 a 3m (Figura 41g). A oitava classe é composta pelas curvas M26 e M27 que não apresentam vegetação aquática submersa em seus pontos e possuem uma coluna d'água que varia de 15 a 20m de profundidade (Figura 41h).

4.4.1 Primeira derivada – classificação por SAM

As curvas da derivada de primeira ordem também foram organizadas segundo a classificação por SAM. Foi verificada uma maior semelhança entre as curvas de uma mesma classe gerada pela classificação supervisionada em comparação aos resultados da análise de agrupamento. A Figura 42 apresenta gráficos representativos das curvas de derivada de ordem 1, separadas segundo a classificação utilizando SAM. Com exceção do agrupamento 5 (Figura 42e), todas as demais classes são formadas por curvas muito similares em termos de forma.

Analisando as classes 4 e 8 que não apresentam vegetação aquática submersa, verifica-se o mesmo pico negativo, no comprimentos de onda de 595 nm. Han (2002) também detectou essa mesma feição nas curvas da primeira derivada da reflectância de medidas com maiores alturas de coluna d'água sobre o dossel da vegetação, no entanto, esse pico estava deslocado para direita, em 600 nm. Nessas curvas é identificada uma discreta feição negativa em 720 nm, associada à turbidez (GOODIN *et al.*, 1993). Nessas curvas não são encontradas quaisquer feições que possam ser associados à presença de macrófitas submersas, como picos positivos em 530 e 700 nm.

Entretanto, as curvas das classes 1 e 5 apresentam feições na primeira derivada associadas tanto com a presença e quanto ausência de vegetação aquática submersa. Essas classes são caracterizadas por serem formadas por curvas coletadas em locais rasos sem macrófitas submersas ou com plantas aquáticas submersas com uma altura de coluna d'água sobre ao dossel superior a 2 m. Com exceção do ponto M18, do agrupamento 5, todas as curvas apresentam a feição negativa em 595 menor do que o pico negativo em 720 nm, associado à turbidez.

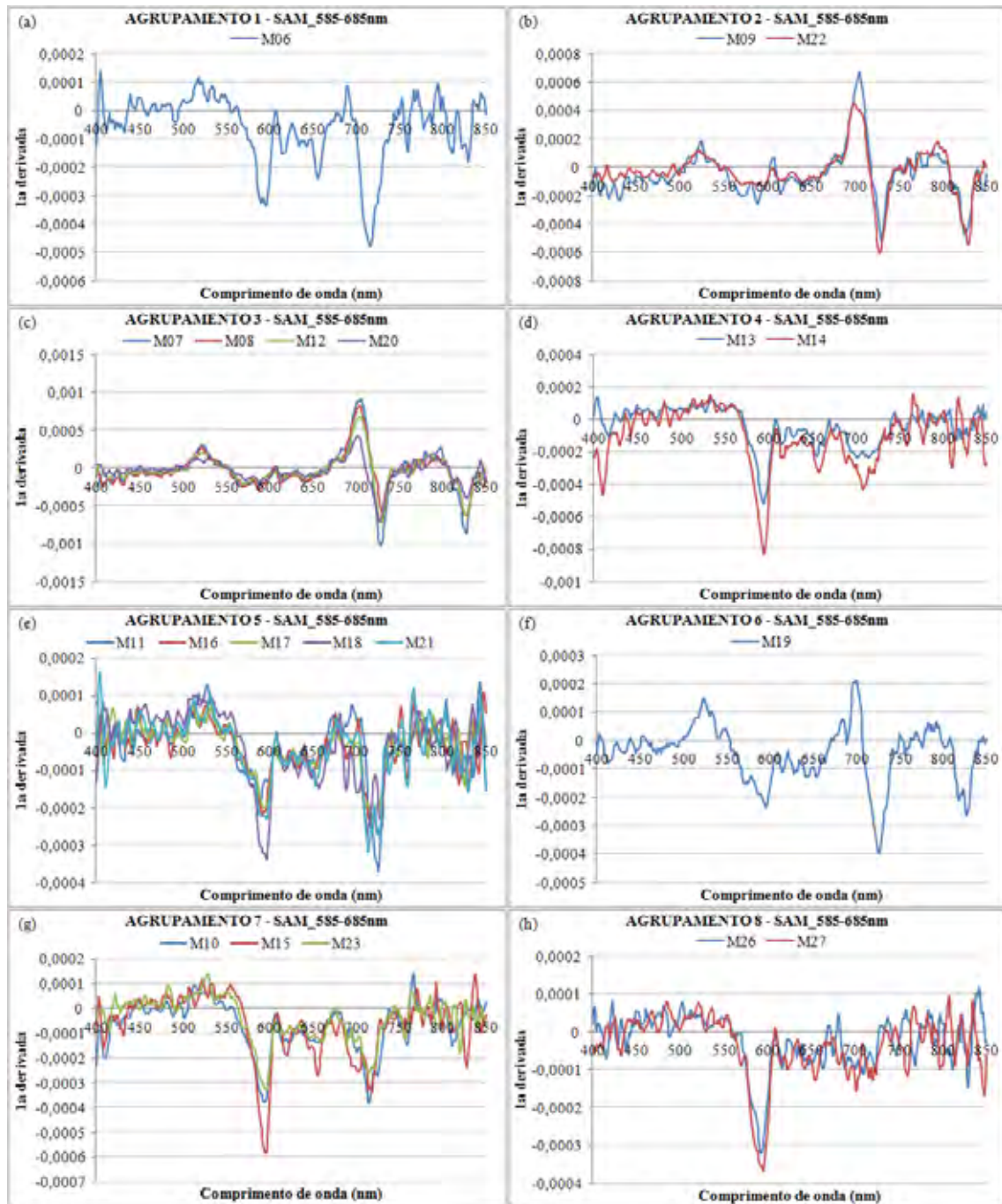


Figura 42 – Agrupamentos das curvas de 1ª derivada da reflectância segundo a classificação pelo SAM

Já os grupos 2, 3 e 6 (Figura 42) possuem padrões característicos da resposta espectral da vegetação aquática submersa, como feições positivas nos comprimentos de onda de 530 nm e 700 nm. Todos apresentam, também, o pico negativo em 720 nm, associado à turbidez (GOODIN *et al.*, 1993). Dentre essas curvas, duas delas, M09 e M19, possuem a feição negativa em aproximadamente 600 nm que surge quando a vegetação aquática submersa se encontra distante da superfície d'água (HAN, 2002). As amostras foram coletadas em pontos com 20 cm e 15 cm de altura de coluna d'água sobre o dossel da

vegetação, respectivamente. Entretanto, a curva M20, coletada em um ponto com altura de coluna d'água sobre o dossel maior, não apresenta esse pico bem definido.

4.4.2 Segunda derivada – classificação por SAM

A Figura 43 apresenta os gráficos de segunda derivada da reflectância com as curvas separadas de acordo com as classes geradas pela classificação utilizando SAM. Um padrão espectral observado nas curvas da segunda derivada que apresentam vegetação aquática submersa é o pico positivo em aproximadamente 735 nm. No entanto, quanto maior a altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação, maior o deslocamento deste pico para comprimentos de onda adjacente à esquerda.

Entretanto, a classe 1, formada pela amostra M06 não apresenta vegetação aquática submersa, mas possui essa feição. O ponto M06 possui em muitos aspectos características espectrais de pontos onde a altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação é maior ou onde há baixa cobertura por planta, como as curvas da classe 5. Essas duas classes apresentam, também, um padrão de comportamento espectral na região do espectro visível similar a de curvas tomadas em pontos sem vegetação aquática submersa. O pico negativo em torno de 580 – 585 nm (luz amarela), seguido do pico positivo ao redor de 600 nm, presente nessas classes, são feições características das classes 4, 7 e 8. As classes 4 e 8 não apresentam plantas aquáticas submersas, já a classe 7 é formada por curvas amostradas em pontos com altura de coluna d'água sobre o dossel de 2 – 3 m.

Por outro lado, os espectros de segunda derivada realçaram bem as alterações de curvatura presentes nas regiões do vermelho e do *red edge*, relacionadas à presença de vegetação aquática submersa, nos espectros de reflectância. É possível verificar uma sequência de feições que alternam entre positiva (entre 690 – 697 nm) para negativa (720 nm) e, novamente, positiva (735 nm). Esse padrão espectral nas curvas de derivada de primeira ordem é encontrado em pontos com baixa altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação e está associado ao primeiro pico de reflectância da vegetação, no infravermelho próximo. Já, a mudança na curvatura do espectro de reflectância devido ao segundo pico no infravermelho (810 nm), associado à planta, é representada pela sequência de feições negativa (820 nm) e positiva (835 nm).

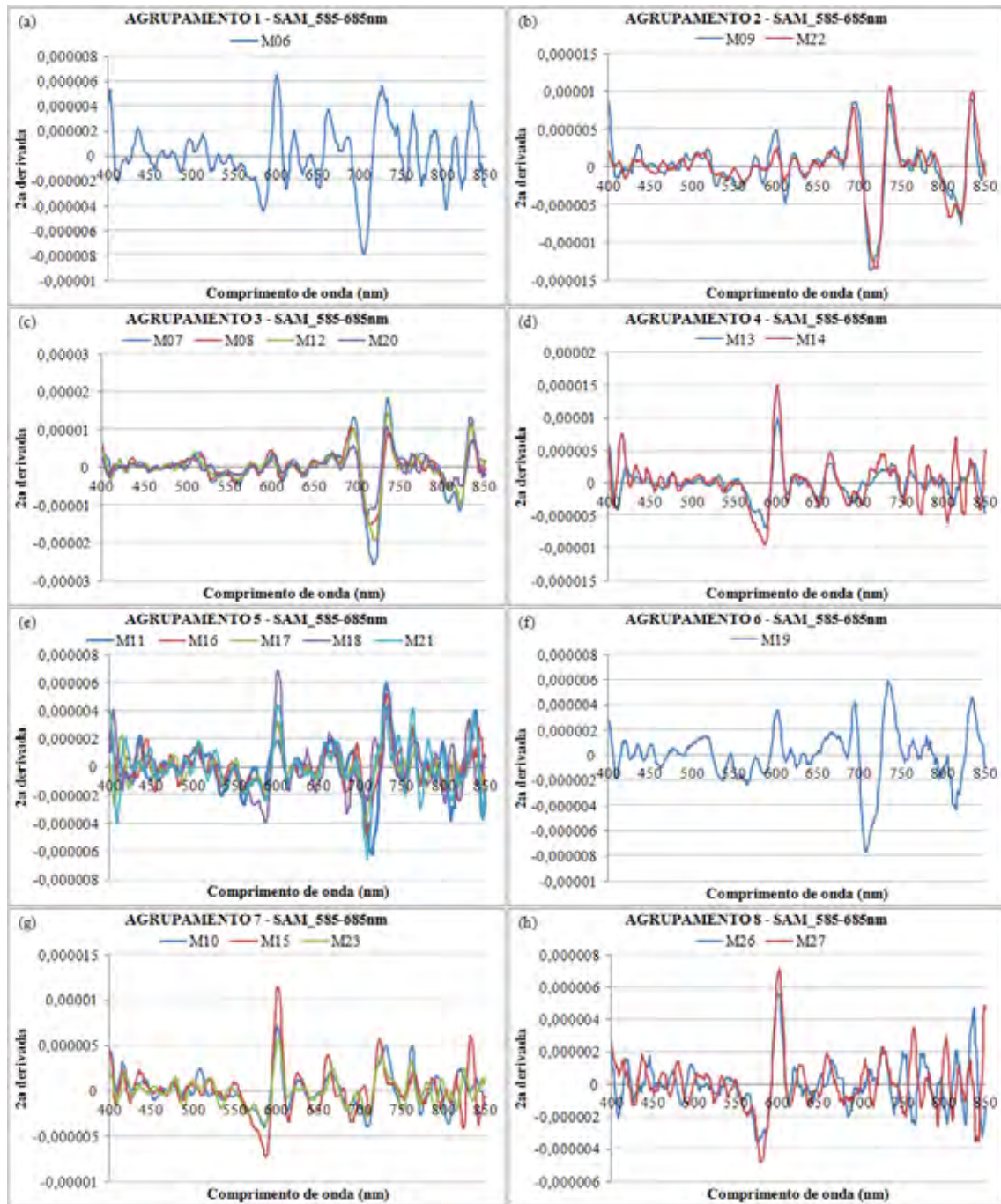


Figura 43 – Agrupamento das curvas de 2ª derivada da reflectância segundo a classificação pelo SAM

Os resultados da aplicação de técnicas de processamento de dados hiperespectrais permitiram a identificação de comprimentos de onda específicos associados à presença de vegetação aquática submersa, bem como padrões diferentes de comportamento espectral em curvas sem plantas e com variações de altura de coluna d'água sobre o dossel. No entanto, parte dessa informação pode ser perdida com o uso de dados multiespectrais.

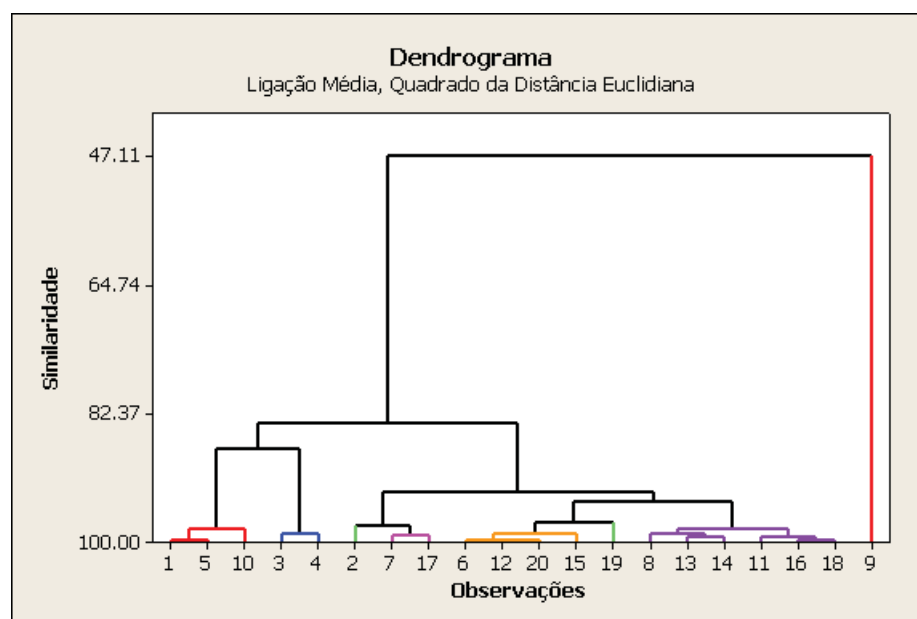
4.5 SIMULAÇÃO SIMPLIFICADA DE CLASSIFICAÇÃO DE DADOS MULTIESPECTRAIS

A partir dos dados de reflectância coletados com espectrorradiômetro também foram realizadas simulações de dados multiespectrais. Os intervalos espectrais adotados se basearam nas bandas de dois sistemas sensores de imageamento multiespectral comercial disponíveis hoje, o *WorldView-2* e o *RapidEye*. Esses dois sistemas têm em comum uma banda na região do vermelho limítrofe (*red edge*), mas com diferentes intervalos de comprimento de onda, de 705 – 745 nm para o sistema *WorldView-2*, e 690 – 730 nm para o *RapidEye*.

O sensor *WorldView-2* apresenta ainda outras bandas espectrais adicionais, não comumente encontradas em sensores de imageamento multiespectral, como as bandas costal (400 – 450 nm), amarela (585 – 625 nm) e infravermelho próximo-II (860 – 1040 nm). A partir das análises das curvas de reflectância, foi detectada alterações na curvatura na região do amarelo com a presença da vegetação aquática submersa.

A primeira simulação foi realizada utilizando os intervalos de banda do *WorldView-2*. Foram geradas as médias da reflectância que foram utilizadas como dados de entrada da classificação não-supervisionada, adotando análise de agrupamento por observações. Foi utilizado o quadrado da distância Euclidiana como medida de similaridade, a ligação média como critério de decisão de distância entre os *clusters* e um nível de similaridade mínimo de 95. O resultado da classificação é apresentado no dendograma da Figura 44. Abaixo do dendograma é apresentada uma tabela identificando a curva correspondente a cada uma das observações representadas no dendograma e a altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa.

Os agrupamentos não apresentaram resultados satisfatórios. O uso desses dados gerou muita confusão na classificação, agrupando em uma mesma classe espectral curvas totalmente distintas em termos de presença de vegetação aquática submersa. Dentre os pontos com características mais semelhantes classificados em agrupamentos diferentes podem ser citados M13 e M14, bem como M26 e M27. Nenhuma apresenta macrófitas submersas, se diferenciando pela altura da coluna d'água. Analisando o dendograma, verifica-se que essas curvas não compõem um mesmo grupo, sendo agrupados a curvas com plantas submersas próximas à superfície.



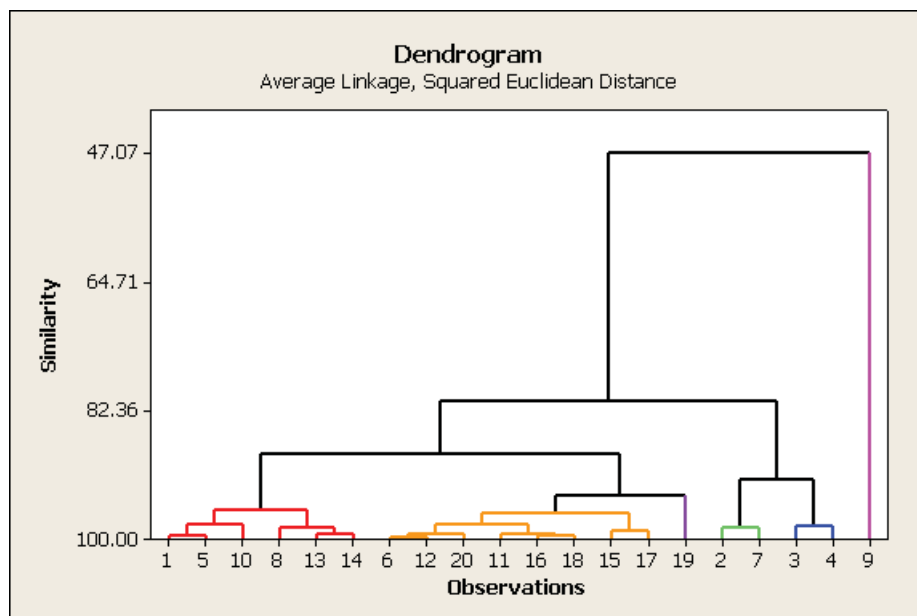
ID	PONTO	ID	PONTO	ID	PONTO	ID	PONTO
1	M06 (S/P)*	6	M11 (0,46m)	11	M16 (0,63m)	16	M21 (0,5m)
2	M07 (0,15m)	7	M12 (0,07m)	12	M17 (1m)	17	M22 (0,05m)
3	M08 (0,01m)	8	M13 (S/P)*	13	M18 (0,22m)	18	M23 (2m)
4	M09 (0,2m)	9	M14 (S/P)*	14	M19 (0,15m)	19	M26 (S/P)*
5	M10 (2m)	10	M15 (3m)	15	M20 (0,3m)	20	M27 (S/P)*

*(S/P) – Pontos onde não foram detectadas a presença de plantas aquáticas submersas

Figura 44 – Simulação de classificação – intervalos de banda do *WorldView-2*

Na segunda simulação também foi feita utilizando análise de agrupamento, adotando como medida de similaridade o quadrado da distância Euclidiana, a ligação média como critério de decisão para distância entre os agrupamentos e nível de similaridade de no mínimo de 95. A Figura 45 apresenta o resultado da segunda simulação a partir do dendrograma gerado com a análise de agrupamento, utilizando as médias de reflectância dos intervalos de comprimento de onda das bandas do sensor *RapidEye*. Logo abaixo do dendrograma é apresentada uma tabela identificando a curva correspondente a cada uma das observações e a altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa.

A segunda simulação gerou muitas classes iguais as da primeira simulação, como, por exemplo, os agrupamentos (M08 e M09), (M06, M10 e M15) e (M09). As curvas M13, M18 e M19, tanto na primeira quanto na segunda simulação, foram agrupadas a uma mesma classe. No entanto, em termos de coluna d'água e vegetação, o ponto M13 apresenta características totalmente diferentes das outras curvas, sem vegetação aquática submersa e coluna d'água de 6 m. Por sua vez, os pontos M18 e M19 possuem as plantas relativamente próximas à superfície d'água, com alturas de coluna d'água sobre o dossel de 0,22 m e 0,15 m, respectivamente.



ID	PONTO	ID	PONTO	ID	PONTO	ID	PONTO
1	M06 (S/P)*	6	M11 (0,46m)	11	M16 (0,63m)	16	M21 (0,5m)
2	M07 (0,15m)	7	M12 (0,07m)	12	M17 (1m)	17	M22 (0,05m)
3	M08 (0,01m)	8	M13 (S/P)*	13	M18 (0,22m)	18	M23 (2m)
4	M09 (0,2m)	9	M14 (S/P)*	14	M19 (0,15m)	19	M26 (S/P)*
5	M10 (2m)	10	M15 (3m)	15	M20 (0,3m)	20	M27 (S/P)*

*(S/P) – Pontos onde não foram detectadas a presença de plantas aquáticas submersas

Figura 45 – Simulação de classificação – intervalos de banda do *RapidEye*

As simulações de classificação utilizando a média da reflectância das curvas amostradas para o intervalo de banda dos sensores *WorldView-2* e *RapidEye* não apresentaram bons resultados. Como pode ser verificado, as simulações, independentemente dos intervalos de banda utilizados, apresentaram muitos erros de classificação. Ao ser acrescentado a interferência atmosférica, dentre outros fatores que podem mascarar a verdadeira resposta espectral de um alvo, o uso desses dados pode apresentar resultados ainda piores do que os obtidos.

4.6 ANÁLISE DOS DADOS DE IRRADIÂNCIA E RADIÂNCIA

Os dados subaquáticos e os tomados logo acima da superfície, de irradiância ascendente e descendente, e radiância ascendente, foram coletados em 7 pontos de amostragem, nos quais 3 deles apresentaram algum problema no momento da aquisição dos dados. Os fatores que prejudicaram a tomada dos dados foram à excessiva movimentação da embarcação, fazendo com que em cada profundidade as medidas fossem tomadas em uma posição diferente, bem como a saturação da radiação e o longo tempo de execução para

aquisição das medidas. Devido à lenta amostragem, por volta de 45 minutos por ponto, havendo uma mudança grande do fluxo incidente nesse período haverá saturação da radiação em relação à radiação no momento da otimização do espectrorradiômetro. No entanto, mesmo nos pontos que apresentaram algum problema, alguma medida pôde ser aproveitada.

São apresentados e discutidos os gráficos de irradiância ascendente e descendente, e radiância ascendente tomados em diferentes profundidades, em 2 pontos de amostragem. A Figura 46a mostra o gráfico de irradiância descendente do ponto M01, caracterizado como um local raso, com aproximadamente 1 m de coluna d'água, e vegetação aquática submersa apenas no fundo. Neste ponto, as medidas foram tomadas adotando intervalos de 10 cm.

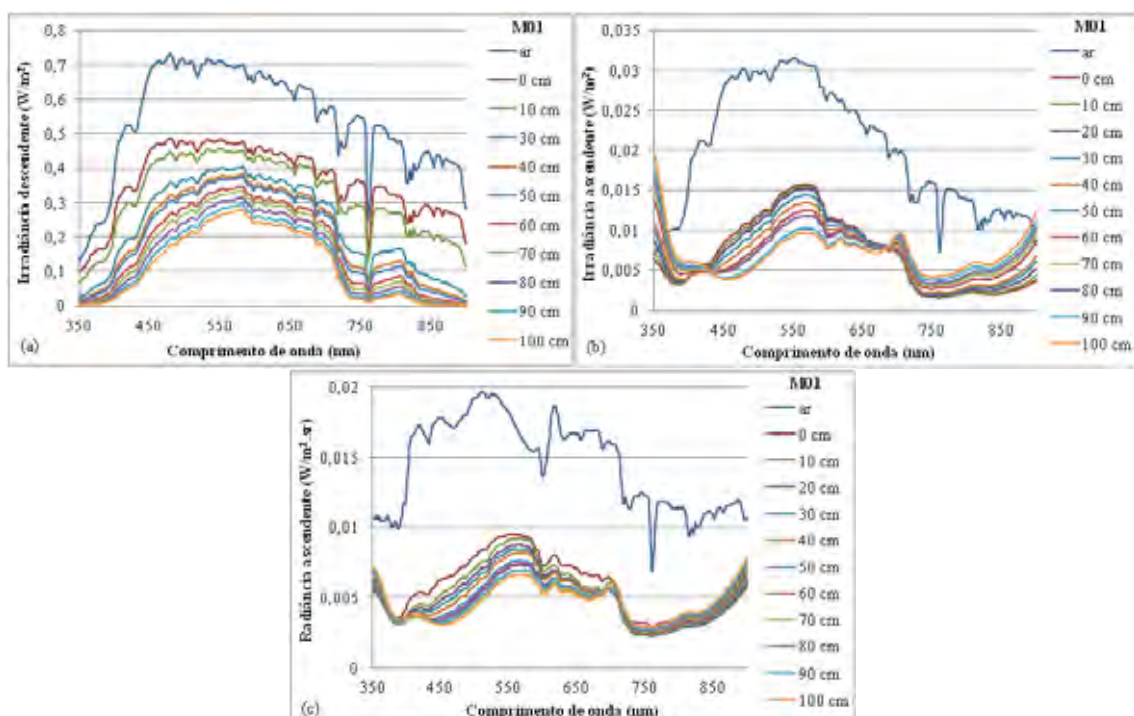


Figura 46 – Medidas subaquáticas do ponto M01, de (a) irradiância descendente, (b) irradiância ascendente e (c) radiância ascendente

Na primeira curva (ar), cuja radiação é tomada logo acima da superfície d'água, nota-se maior irradiância incidente na região do azul, com intensidade máxima em aproximadamente 479 nm, e menor no comprimento de onda de 760 nm. Ao comparar a curva “ar” a uma medida tomada logo abaixo da superfície da água (0 cm) verifica-se que a água atenua fortemente a radiação logo nos primeiros milímetros, em todos os comprimentos de onda a partir de 405 nm (espectro óptico). No entanto, ao analisar conjuntamente todas as curvas de irradiância descendente tomadas em diferentes profundidades, é possível verificar uma maior atenuação da radiação, pela água, dos comprimentos de onda do infravermelho próximo.

Verifica-se, também, que quanto mais profunda é tomada a medida, o comprimento de onda em 576 nm é menos atenuado em relação aos demais comprimentos de onda, formando um pico, como pode ser visto na curva adquirida a 100 cm (Figura 46a). Na região do infravermelho próximo, observa-se que quanto maior a profundidade da aquisição das medidas, a diferença entre a feição de absorção em 760 nm diminui em comparação aos comprimentos adjacentes.

Nota-se, também, nas curvas de irradiância descendente que os comprimentos de onda em 720 nm e 810 nm são os menos atenuados no intervalo do infravermelho próximo. Nesses dois comprimentos de onda são encontrados os picos associados à vegetação aquática submersa em curvas de reflectância espectral.

A Figura 46b mostra o gráfico com as curvas de irradiância ascendente medidas em diferentes profundidades, do ponto de amostragem M01. Analisando as curvas medidas logo acima e logo abaixo da superfície d'água, nota-se que a diferença entre elas é maior em comparação as medidas de irradiância descendente tomadas nas mesmas posições. Esse fenômeno ocorre devido à interferência da dupla atenuação sofrida pela radiação. Além disso, a medida realizada logo acima da superfície apresenta uma contribuição oriunda da reflectância especular da água ou efeito *gliter*. Como pode ser notada, a irradiância ascendente na coluna d'água é sempre maior na região do verde, devido às características de espalhamento da água, maior nesses comprimentos de onda.

Ao analisar as curvas de radiância ascendente (Figura 46c) verifica-se que as medidas obtidas em locais mais profundos, ou seja, mais próximas ao dossel da vegetação aquática submersa, apresentam maior intensidade nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Além da presença da planta, esse comportamento está associado ao processo de atenuação da radiância ascendente pela coluna d'água. Nota-se também um comportamento espectral estranho da curva coletada no ar, incomum para corpos d'água.

A Figura 47 apresenta os gráficos das três medidas subaquáticas coletadas no ponto M24. Segundo os dados hidroacústicos, este ponto amostral é caracterizado pela presença de macrófitas submersas com uma altura de coluna d'água sobre o dossel de 2 m e profundidade da coluna d'água de 4,5 m. Ao analisar a irradiância descendente (a) é verificada menor atenuação do comprimento de onda de 560 nm (luz verde) pela água. A água pura por si só tem a característica de refletir comprimentos de onda da região do verde. Porém, em alguns casos, uma feição de reflectância nessa região pode ser associada à vegetação aquática submersa (HAN, 2002) ou à clorofila algal (RUNDQUIST *et al.*, 1996).

A região do azul é menos absorvido pela água, no entanto a partir da profundidade de 80 cm essa região do espectro começa aparentar uma maior atenuação. As bandas do amarelo, vermelho e vermelho limítrofe (700 nm), a 2 m de profundidade, apresentam relativamente maior intensidade, em relação aos demais comprimentos de onda. O comprimento de onda em 810 nm (infravermelho próximo) é altamente atenuada pela coluna d'água, no entanto, por apresentar resposta espectral associada à presença de vegetação aquática submersa, possui maior intensidade em relação aos comprimentos adjacentes dessa região do espectro.

A análise das curvas de irradiância ascendente (Figura 47b) mostra uma contribuição da vegetação aquática submersa nas medidas adquiridas em 1,8 m e 2 m de profundidade. Nelas se verifica uma maior intensidade no comprimento de onda em 700 nm, que não é observado nas curvas coletadas em posições mais rasas. Essa feição de menor absorção é discretamente observada nas medidas de radiância ascendente nas mesmas profundidades.

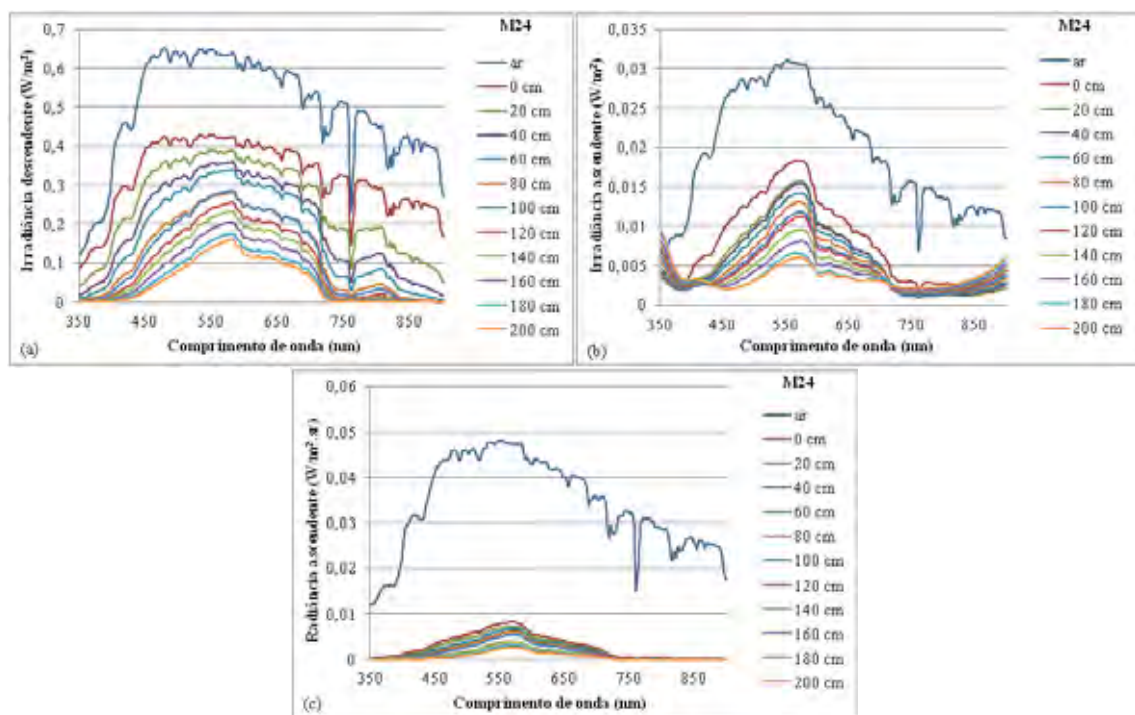


Figura 47 – Medidas subaquáticas do ponto M24, de (a) irradiância descendente, (b) irradiância ascendente e (c) radiância ascendente

Comparando as curvas de radiância ascendente coletadas acima da superfície dos pontos M24 e M01, verifica-se que essa grandeza radiométrica apresenta um comportamento espectral muito diferente entre si. No ponto M24, nota-se que os dados de radiância se assemelham mais aos dados de irradiância, tanto ascendente quanto descendente, do que as

curvas do ponto M01 que apresentam uma assinatura espectral não comum para corpos d'água.

A análise simultânea das medidas de todos os pontos facilita verificar diferença entre eles. A Figura 48 mostra as curvas de radiância ascendente coletadas logo abaixo da superfície da água, em 5 pontos de amostragem, com diferentes alturas de coluna d'água sobre o dossel da vegetação.

Os pontos M02, M04 e M05 apresentam praticamente o mesmo padrão de comportamento em todo espectro. Nestes pontos, é possível verificar um pico de radiância em aproximadamente 700 nm, provavelmente associada à presença da vegetação aquática submersa, que se encontra mais próxima à superfície do que nos outros dois pontos. Observa-se, também, uma leve reflexão na região do verde, mas que não gera um grande gradiente em relação aos demais comprimentos da região do visível.

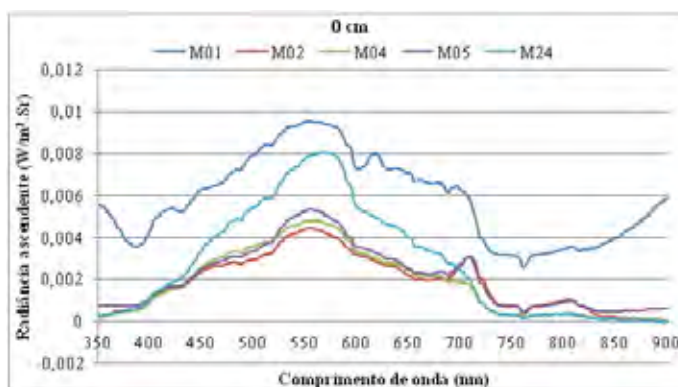


Figura 48 – Medidas de radiância ascendente tomadas na profundidade de 0 cm

Por outro lado, as curvas M01 e M24 apresentam comportamentos totalmente distintos das demais. A curva de radiância do ponto M01 possui uma alta resposta em praticamente todo espectro visível até o vermelho limítrofe. Em geral, alta intensidade no espectro visível pode estar associada à alta concentração de sólidos em suspensão. Este é um ponto onde foi constatada baixa turbidez 2,96, no entanto, esse valor é pelo menos 1,4 NTU maior que a turbidez do próximo ponto mais turbido. Por outro lado, esse comportamento pode estar associado à contribuição da reflexão do substrato de fundo neste local, já que infestação por vegetação aquática submersa é baixa e coluna d'água é rasa, atingindo aproximadamente 1 m.

Analisando a curva de radiância do ponto M24, é possível verificar como a coluna d'água interfere sobre a resposta espectral das plantas aquáticas submersas. O ponto M24 possui uma altura de coluna d'água sobre o dossel de 2 m e, diferente de outros pontos amostrais que também apresentam macrófitas submersas, a curva M24 não apresenta

característica de maior intensidade em torno do comprimento de onda de 700 nm. Ao analisar somente o pico de radiância em 560 nm não é possível afirmar com consistência que este comportamento esteja associado à presença das plantas.

4.7 AJUSTE DE MODELOS DE ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO AO LONGO DA COLUNA D'ÁGUA

Baseados nos resultados obtidos com as análises dos dados de reflectância foram selecionados alguns comprimentos de onda associados à presença de vegetação aquática submersa para serem utilizados em uma análise de regressão. O objetivo dessa análise é estimar o decréscimo da radiância ascendente em uma dada trajetória vertical dentro da coluna d'água.

Os modelos de regressão foram ajustados aos dados de radiância ascendente em função da profundidade de aquisição dos dados dos pontos M01 e M24. A Tabela 9 apresenta a análise de variância dos modelos lineares ajustados aos diferentes comprimentos de onda. A partir da análise de variância (ANOVA) (Tabela 9), conclui-se que o comprimento de onda em 560 nm apresenta ótimos resultados, com alto valor do coeficiente de correlação e os menores erros de ajuste.

Tabela 9 – ANOVA – M01(Radiância ascendente X Profundidade de medida)

λ (nm)	R ²	R ² (adj)	SQ	MQ	F	p-valor	ESQ	EMQ	TSQ
560	94,8	94,2	0,0000091	0,0000091	164,5	0,000	0,0000005	0,0000001	0,0000096
560*	95,4	94,9	0,0373351	0,0373351	188,3	0,000	0,0017842	0,0001982	0,0391194
585	94,6	93,9	0,0000071	0,0000071	156,2	0,000	0,0000004	0,0000000	0,0000075
700	11,8	2,0	0,0000001	0,0000001	1,2	1,2	0,0000006	0,0000001	0,0000007
720	48,2	42,4	0,0000005	0,0000005	8,36	0,018	0,0000005	0,0000001	0,0000010
810	56,2	51,3	0,0000007	0,0000007	11,54	0,008	0,0000005	0,0000001	0,0000012

No entanto, a partir dos gráficos da Figura 49 de ajuste do modelo (a) e da análise dos resíduos da regressão (b), conclui-se que o modelo é inadequado para explicar a atenuação da radiância em relação à profundidade. Primeiramente, pode ser observado que muitos dos pontos do gráfico de ajuste se encontram fora do intervalo de confiança do modelo. Além disso, para que um modelo de regressão seja adequado, os resíduos devem satisfazer três critérios: normalidade, independência e homoscedasticidade.

Analisando a Figura 49b, verifica-se no gráfico de probabilidade normal e no histograma que os resíduos não são normais. O histograma apresenta duas modas, sendo a

maior deslocada para direita. O gráfico de valor ajustado versus resíduos verifica a homoscedasticidade dos resíduos que, neste caso não apresenta uma distribuição aleatória, o que indica que os resíduos não são homoscedásticos. O gráfico de ordem das observações versus os resíduos avalia a hipótese de independência. Para satisfazer essa hipótese, este gráfico também deveria apresentar uma distribuição aleatória, o que não se verifica neste caso.

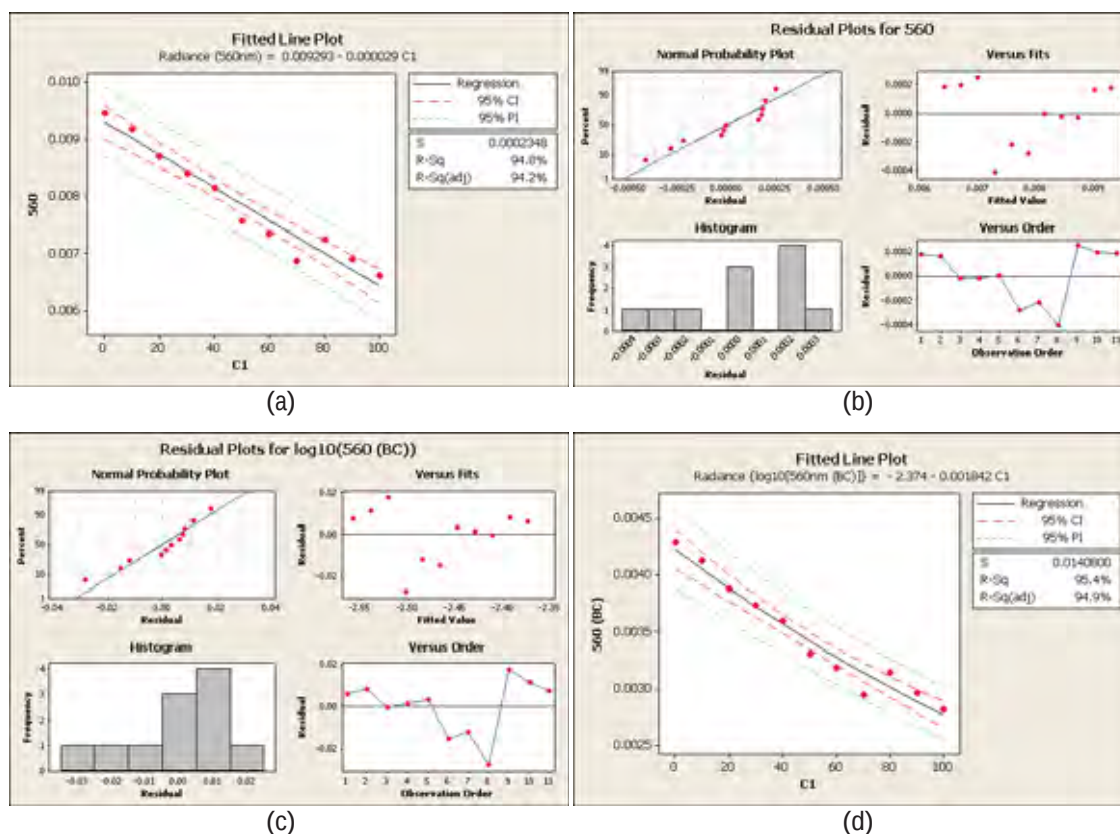


Figura 49 – Análise de regressão para 560 nm. Transformação Box-Cox

Para tentar normalizar os dados, foi aplicada uma transformação Box-Cox sobre os dados de radiância. Assim, foi ajustado um novo modelo linear entre os dados de profundidade em relação ao logaritmo na base 10 da radiância transformada. A Tabela 10 apresenta o resultado da análise de variância. Apesar de apresentar valores altos do coeficiente de correlação, os erros de ajuste são bem maiores em relação aos ajustes aplicados sobre os dados não transformados.

A Figura 49c apresenta o gráfico de ajuste do modelo dos dados de profundidade versus o valor do logaritmo na base 10 da radiância em 560 nm e a Figura 49d os gráficos da análise de resíduos da regressão. Em relação ao modelo de ajuste gerado, visualmente, pode

ser observada pouca melhora, verificando-se ainda pontos fora do intervalo de confiança do ajuste, de 95%.

O uso desses dados provocou uma leve melhora na normalidade dos resíduos, principalmente no gráfico de probabilidade normal. Entretanto, os gráficos de valor ajustado versus resíduos e ordem das observações versus resíduos mostram que os resíduos não são homoscedásticos e nem independentes, respectivamente.

A análise de regressão também foi aplicada aos dados de radiância ascendente do ponto amostral M24. A Tabela 10 mostra o resultado da análise de variância aplicada aos comprimentos de onda 560, 585, 700 e 720 nm.

Tabela 10 – ANOVA – M24 (Radiância ascendente X Profundidade de medida)

λ (nm)	R2	R2(adj)	SQ	MQ	F	p-valor	ESQ	EMQ	TSQ
560	97,5	97,2	0,0000349	0,0000349	346,66	0,000	0,0000009	0,0000001	0,0000358
585	95,8	95,3	0,0000299	0,0000299	205,52	0,000	0,0000013	0,0000001	0,0000312
700	97,5	97,2	0,0000037	0,0000037	348,64	0,000	0,0000001	0,0000000	0,0000038
720	86,4	84,6	0,0000005	0,0000005	50,63	0,000	0,0000001	0,0000000	0,0000006

O comprimento de onda em 700 nm apresentou os melhores parâmetros, ao contrário do resultado obtido para os dados de radiância do ponto M01, deste mesmo comprimento de onda, em que obteve o pior resultado entre os comprimentos analisados. A Figura 50 apresenta o gráfico de ajuste do modelo linear (a) e a análise dos resíduos da regressão (b). Na Figura 50a, verifica-se que 2 pontos estão fora do intervalo de confiança de 95% do modelo, não sendo este totalmente adequado.

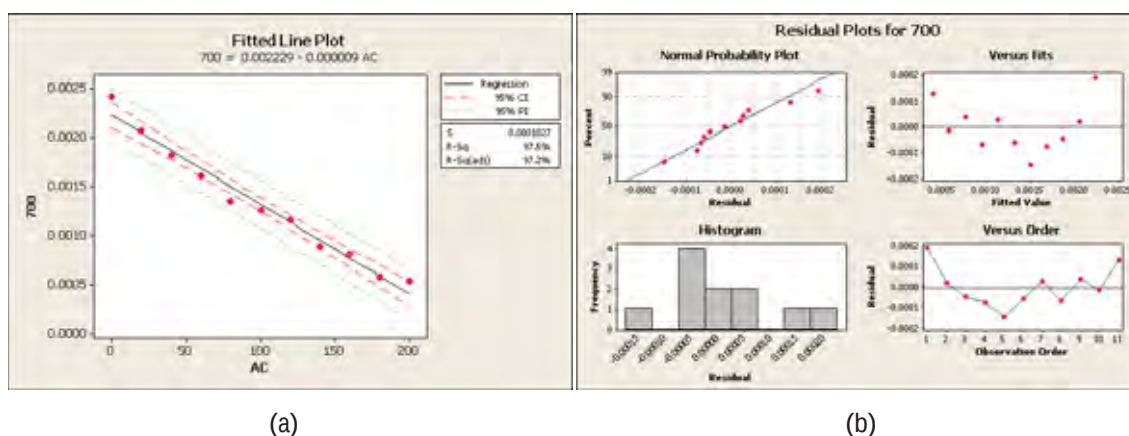


Figura 50 – Ajuste de modelo de regressão dos dados em 700 nm e (a) análise de resíduos

Ao analisar o resíduo da regressão corrobora-se que o modelo ajustado não é ideal. Dentre os quatro gráficos, na Figura 50b, o de probabilidade normal é o que apresenta

melhor resultado. No entanto, ao analisar o histograma dos resíduos conclui-se que eles não são normais. Da mesma forma, ao observar a distribuição dos resíduos nos gráficos de resíduos versus ajuste e versus ordem das observações, verifica-se que eles não são homoscedásticos e independentes, respectivamente. Entretanto, comparando os resultados da análise de regressão aplicada ao comprimento de onda em 560 nm, do ponto M01, e os obtidos aplicando em 700 nm, do ponto M24, conclui-se que o segundo apresentou melhor resultado.

Apesar da aparência linear do decréscimo da radiância ascendente em relação ao aumento da profundidade de coleta, modelos lineares não foram adequados para explicar esse comportamento. A literatura mostra que esse decréscimo da radiância ascendente é explicado por um modelo exponencial, sendo função da profundidade da coluna d'água. A Figura 51 compara duas curvas de ajuste, uma linear (a) e outra exponencial (b), para o comprimento de onda de 700 nm, do ponto M24. O pacote estatístico adotado, *Minitab*, não apresenta a opção de ajuste exponencial, por este motivo, adotou-se o aplicativo *Excel*.

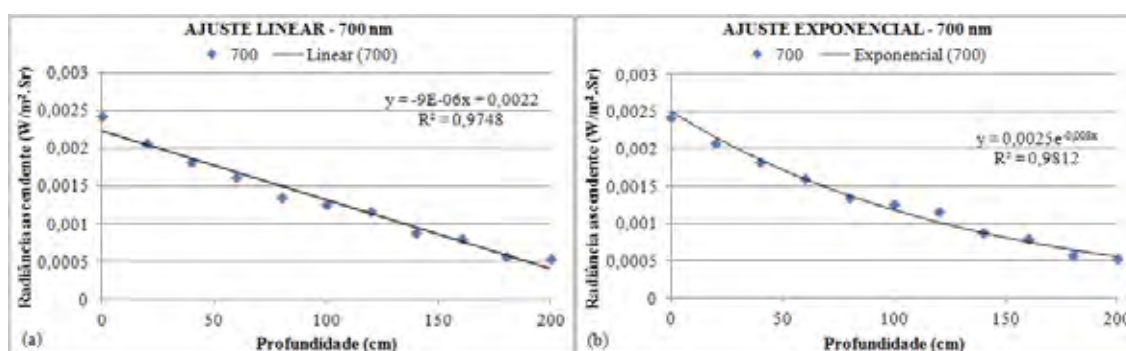


Figura 51 – Ajuste de linha de tendência linear (a) e exponencial (b)

O aplicativo *Excel* gera uma função do tipo exponencial que melhor se ajusta a tendência da distribuição dos pontos. No entanto, são desconhecidos os cálculos para obtenção do valor de R^2 da função exponencial apresentada, sendo no caso da função linear, R^2 o quadrado do coeficiente de correlação entre a profundidade e a radiância ascendente em 700 nm. A Tabela 11 apresenta a análise de variância do modelo exponencial ajustado. A partir da ANOVA verifica-se que o modelo explica mais de 99% da variabilidade total.

Tabela 11 – Análise de Variância do ajuste exponencial – M24

FONTE DE V.	G. L.	SQ	SQM	F	R^2	$R^2(\text{adj})$
Regressão	1	0,000022147	0,000022147	2206,178	0,995937	0,99999
Resíduo	9	0,000000090	0,000000010			
Total	10	0,000022237	0,00002224			

Para avaliar a qualidade do modelo foram testados os critérios de normalidade, homoscedasticidade e independência (Figura 52). Ao analisar o gráfico de probabilidade normal dos resíduos, dado o valor de 0,962 para o p-valor e um nível de significância de 0,01, tem-se que a hipótese de normalidade dos resíduos não é rejeitada. Logo, os resíduos satisfazem o critério de normalidade. A partir do histograma também foi possível verificar que os resíduos são normais.

Já o gráfico de resíduos versus ajuste não apresenta uma distribuição aleatória dos resíduos, mostrando que estes não são homoscedásticos. Da mesma forma, o gráfico de resíduos versus ordem também parece seguir certa tendência, mostrando que os resíduos são dependentes.

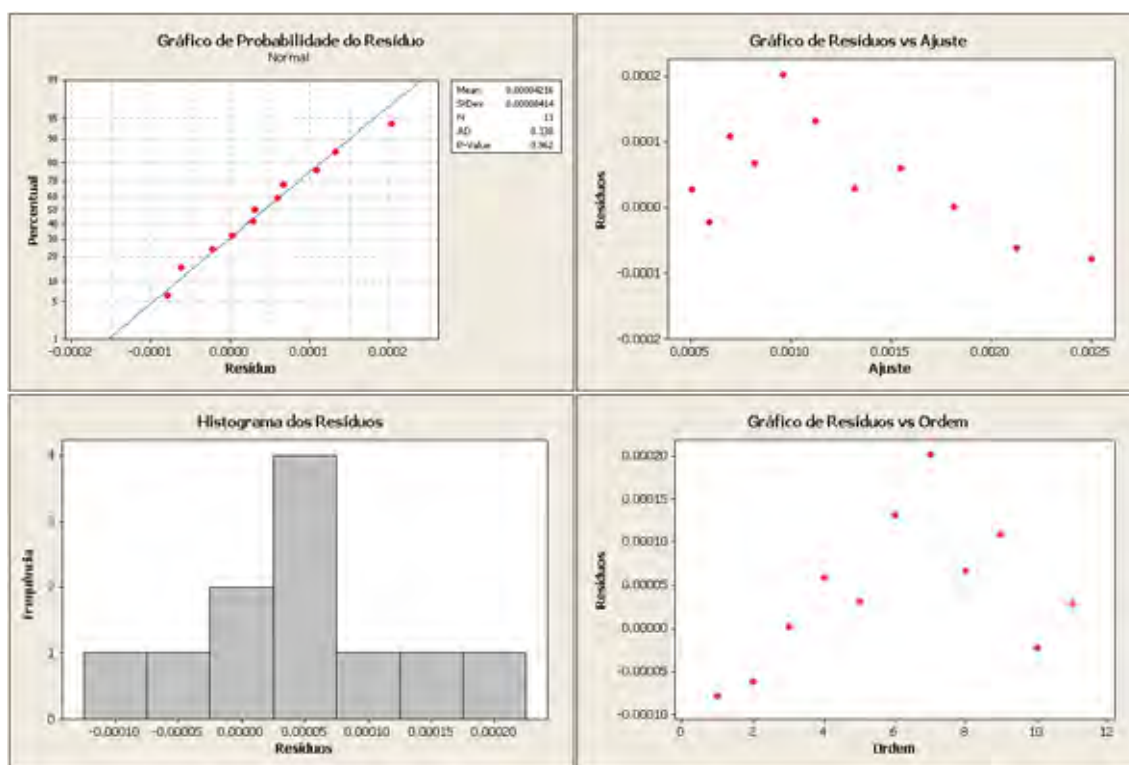


Figura 52 – Análise dos resíduos do modelo exponencial – 700 nm

Apesar de não atender perfeitamente a todos os critérios necessários para que o modelo de regressão possa ser considerado adequado, o modelo exponencial apresentou performance superior comparado ao modelo linear, gerando uma distribuição normal dos resíduos. Como o intervalo dos dados não abrange locais mais profundos, não é possível modelar todo comportamento de atenuação da luz ao longo da coluna d'água. Assim, é possível que por esta razão, os resíduos não satisfaçam os critérios de homoscedasticidade e independência. No entanto, a partir dos resultados obtidos, acredita-se que o modelo

exponencial seja o mais adequado para explicar esse processo de atenuação, como afirma a literatura.

4.8 ESTIMATIVA DE REFLECTÂNCIA DE SENSORIAMENTO REMOTO, REFLECTÂNCIA DE IRRADIÂNCIA DE SUBSUPERFÍCIE E RAZÃO DE IRRADIÂNCIAS

A partir das medidas subaquáticas e coletadas logo acima da superfície foi possível também estimar três propriedades ópticas aparentes: reflectância de sensoriamento remoto ($R_{SR} = L_u/E_d$), reflectância de irradiância de subsuperfície ($R(0-) = E_u(z=0)/E_d(z=0)$) e a reflectância de irradiância ou razão de irradiâncias ($R = E_u/E_d$). A Figura 53 apresenta os gráficos de reflectância de sensoriamento remoto (a) e reflectância de irradiância de subsuperfície (b) de todas as curvas, as quais foram possíveis estimar essas medidas, para serem comparadas.

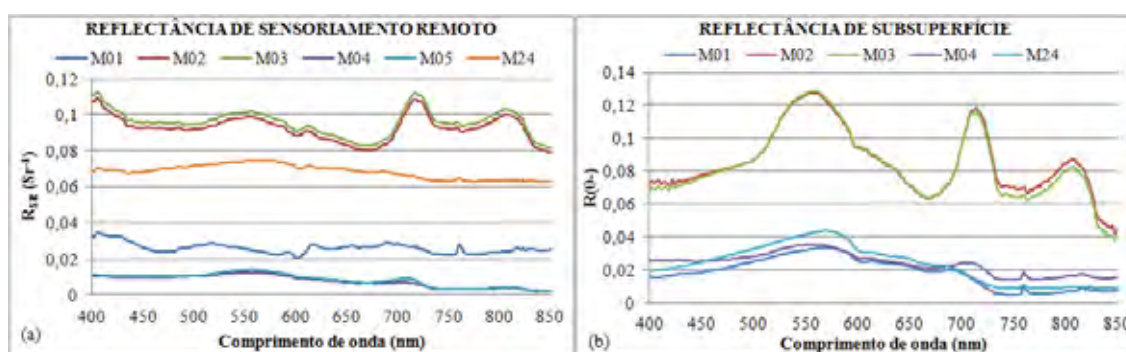


Figura 53 – Medidas estimadas de (a) reflectância de sensoriamento remoto e (b) reflectância de subsuperfície

Ao analisar as curvas de ambos os gráficos, 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. Verifica-se que as curvas M04 e M05 apresentam reflectância de sensoriamento remoto bem menor do que dos espectros M01 e M02. Esta variação pode estar associada com a diferença de 40 cm entre a altura de coluna d'água sobre do dossel da vegetação das primeiras curvas (60 cm) em relação às duas últimas (20 cm). Essa variabilidade pode também estar associada à sensibilidade dessas medidas em relação às mudanças de iluminação no momento da tomada dos dados (MOBLEY, 1994).

O baixo 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.

Para melhor verificar as feições espectrais presentes nas diferentes curvas, estas foram separadas em relação à intensidade das medidas. A Figura 54 apresenta as curvas de reflectância de sensoriamento remoto. Os dados de radiância ascendente e irradiância descendente foram coletados logo acima da superfície, assim, preliminarmente, espera-se que se assemelhassem mais as curvas de fator de reflectância do que de reflectância de subsuperfície. O ponto M01 (a) apresenta um comportamento espectral totalmente diferente das demais curvas, não contendo feições e padrões espectrais semelhantes à de águas interiores. Esse efeito está relacionado ao comportamento espectral estranho da radiância ascendente observado na Figura 46c.

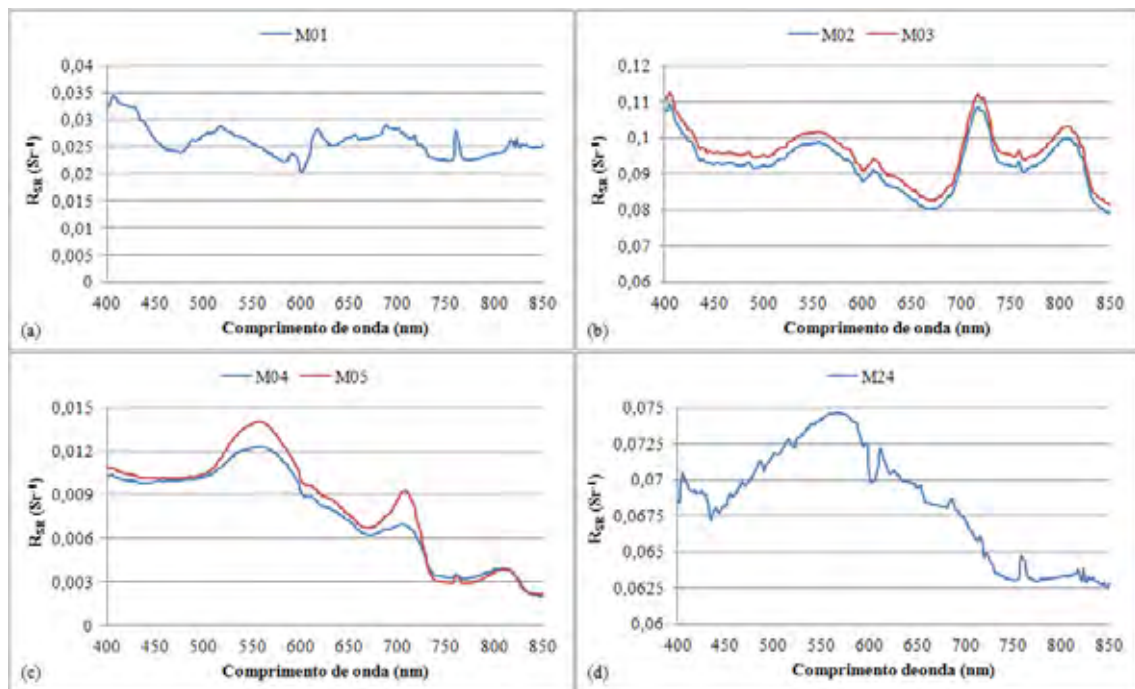


Figura 54 – Reflectância de Sensoriamento Remoto

As curvas de reflectância de sensoriamento remoto das curvas M02, M03 e M05 (Figuras 54b e c) são semelhantes ao comportamento de curvas de fator de reflectância com vegetação aquática submersa, com pequena altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação, por volta de 20 cm.

Tanto as medidas de radiância ascendente quanto de irradiância descendente, dos pontos M04 e M05, foram coletadas em locais onde o dossel da vegetação encontrava-se a uma profundidade de 60 cm. No entanto, nota-se uma diferença na região do vermelho limítrofe (ao redor do comprimento de onda de 700 nm), apresentando uma feição de

espalhamento maior para a curva M05. No entanto, a feição em torno de 805 nm, associada à presença de macrófitas submersas, são praticamente iguais. Esta maior reflectância de sensoriamento remoto em 700 nm, na curva M05, pode estar relacionada a uma maior cobertura da vegetação ou até mesmo a erros de medição devido à movimentação da embarcação.

O ponto M24 apresenta um comportamento espectral de águas e aparentemente não apresenta padrões espectrais associados à presença de vegetação aquática submersa. No entanto, essa identificação fica prejudicada devido à alta interferência de ruídos neste espectro. Esta curva apresenta também uma feição abrupta de absorção em 600 nm, não comum.

Por outro lado, os espectros de reflectância de irradiância de subsuperfície (Figura 55) são bem menos ruidosos. Além disso, essa variável é bem menos sensível a variação de altura da coluna d'água sobre o dossel da vegetação submersa. Nota-se que a variação da escala de reflectância entre as curvas M01 e M04 é menor.

Neste caso, os pontos M02 e M03 também são muito semelhantes não somente em termos de intensidade, mas de forma. No entanto, o espalhamento na região do verde, com pico máximo em 560 nm, é maior que as feições de espalhamento, também, associadas às macrófitas submersas, no infravermelho próximo, em 700 nm e 805 nm. A maior reflectância dos picos no infravermelho observada nos espectros de reflectância de sensoriamento remoto pode ser relacionada ao IFOV utilizado na coleta dos dados de radiância.

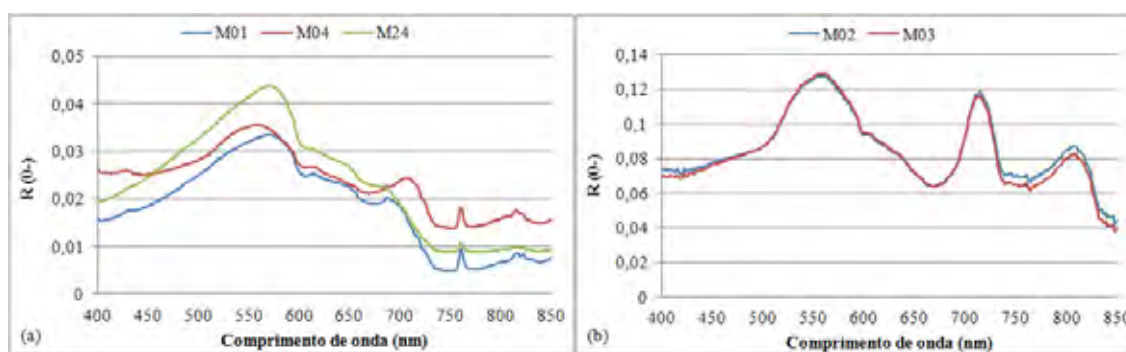


Figura 55 – Reflectância de irradiância de subsuperfície

O comportamento espectral da reflectância de irradiância de subsuperfície do ponto M01 representa um espectro de água, diferente do que foi observada na sua curva de reflectância de sensoriamento remoto. Isso mostra que o problema se encontra nos dados de radiância ascendente, utilizados na estimação da reflectância de sensoriamento remoto.

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 características espectrais da vegetação aquática submersa, realçando mais as feições espectrais 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 56 apresenta as curvas de reflectância de irradiância ao longo da coluna d'água dos pontos M02 (a) e M04 (b). A partir dessas curvas é possível verificar um aumento na reflectância de irradiância em todo espectro visível e o decréscimo da contribuição da resposta espectral da vegetação. A primeira característica verificada pode estar relacionada com a contribuição de radiação por espalhamento volumétrico. Já a segunda, pode estar associada à maior atenuação difusa da irradiância ascendente dos comprimentos de onda no infravermelho próximo.

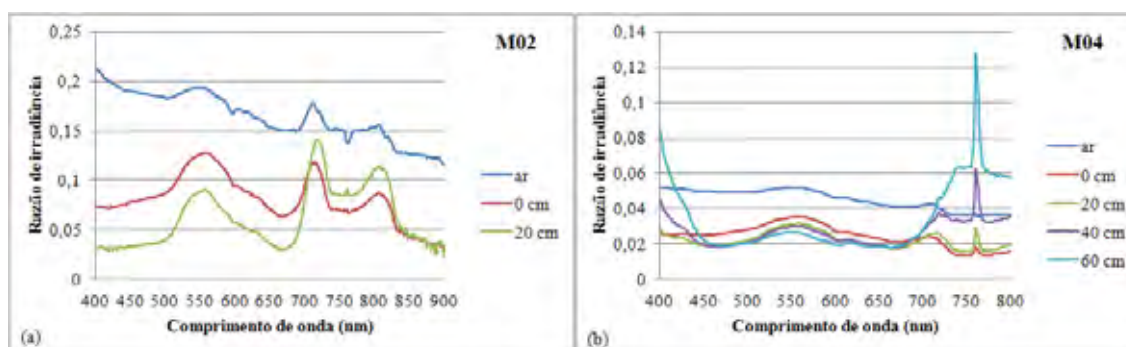


Figura 56 – Razão de irradiâncias dos pontos M02 (a) e M04 (b)

Outra característica encontrada nos espectros de reflectância de sensoriamento remoto, reflectância de irradiância de subsuperfície e fator de reflectância, mas que se encontram mais acentuada nas curvas de razão de irradiâncias associadas a profundidades maiores, é o pico de reflectância em 760 nm, como pode ser observado tanto na Figura 56b quanto na Figura 57. Nota-se que os valores de razão de irradiâncias também são muito altos nos menores comprimentos de onda, de 400 – 450 nm.

Matematicamente, esse comportamento representa um aumento do valor da irradiância ascendente em relação ao da irradiância descendente. Analisando a Figura 57a, nota-se que com o aumento da profundidade, esse comportamento passa a ocorrer em todo infravermelho próximo. Verifica-se também que a partir de uma profundidade de coluna d'água de 1,60 m, o valor da irradiância ascendente torna-se maior do que da irradiância descendente.

Em relação ao comportamento nos maiores comprimentos de onda, em locais mais profundos, este pode estar associado a processos de transferência radiativa. É conhecido

que o coeficiente de atenuação são maiores para os comprimentos de onda do infravermelho e que quanto maior a profundidade menor a irradiância descendente. Por outro lado, o espalhamento, vindo de outras direções, pode contribuir para o aumento da radiação de um feixe de luz que retorna em sentido à superfície. Dessa forma, devido à baixa intensidade da irradiância que atinge regiões mais profundas e o provável aumento do valor da irradiância ascendente, quando calculada as razões entre as irradiâncias, observa-se esse tipo de padrão espectral.

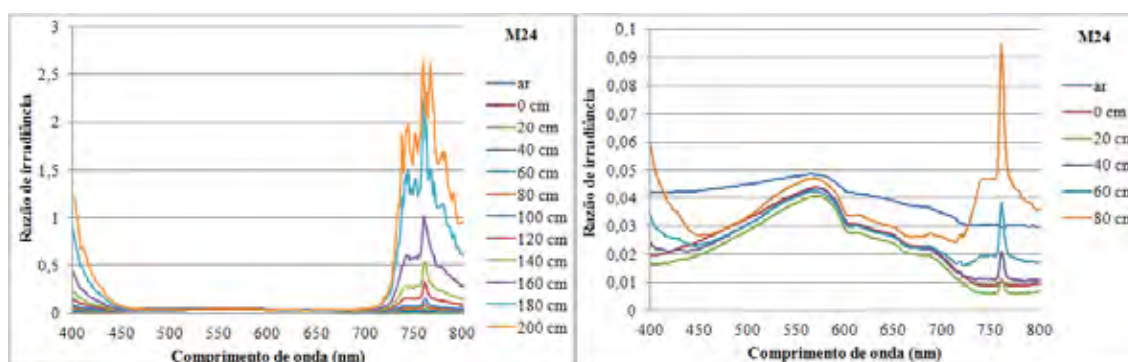


Figura 57 – Razão de irradiancias do ponto M24

5. CONCLUSÕES

No presente estudo, foi possível identificar os principais padrões espectrais e intervalos de comprimento de onda associados à presença de vegetação aquática submersa, bem como a influência da variação da altura de coluna d'água sobre o dossel das macrófitas submersas sobre a resposta espectral registrada. Neste sentido, pode-se concluir que foram atingidos positivamente os objetivos propostos neste trabalho.

A alta heterogeneidade do dossel da vegetação aquática submersa dificultou a aquisição de dados espectrorradiométricos. No entanto, essa mesma característica facilitou, de certa forma, o esquema de amostragem dos dados de reflectância, pois possibilitou a coleta de várias amostras em uma mesma estação, não sendo necessária a seleção de uma grande área de estudos.

Baseado nos quatro levantamentos de campo realizados em diferentes regiões no reservatório de Nova Avanhandava notou-se a presença de perifíton sobre a vegetação aquática submersa em várias regiões do reservatório, durante praticamente todo o ano. No entanto, ainda não é conhecida a influência desse material sobre a resposta espectral das macrófitas submersas.

Ao comparar as condições meteorológicas e de desenvolvimento da vegetação aquática submersa nos meses dos levantamentos de campo, concluiu-se que o mês de outubro é o mais adequado para aquisição de dados espectrais de macrófitas imersas. Neste período, em muitas áreas do reservatório de Nova Avanhandava, as plantas aquáticas submersas atingem sua capacidade suporte. Assim, as chances de obtenção de informação das macrófitas submersas são maiores. Em relação às condições do tempo, há pouco vento, logo se verifica pouca ondulação na superfície da água e a probabilidade de chuvas é menor do que em outros meses de infestação e, conseqüentemente, a turbidez da água é baixa.

A partir da análise dos dados de reflectância foram identificados os principais padrões espectrais, associados à vegetação aquática submersa, definidos pela literatura, como a feição espectral no comprimento de onda de 560 nm e dois picos de reflectância na região do infravermelho próximo, um em 710 nm e outro em 800 nm. A ausência dessas feições em curvas de reflectância, coletadas em pontos sem vegetação aquática submersa, corroboram essas observações.

Entretanto, foi verificado que a coluna d'água sobre o dossel das macrófitas submersas exerce muita influência na posição dessas feições de reflectância. Na feição presente na região espectral do visível, o pico de reflectância associado à vegetação pode ser

descolado até o comprimento de onda de 550 nm. A variação de altura de coluna d'água sobre o dossel da vegetação aquática submersa provoca deslocamento dos dois picos de reflectância, um localizado no *red edge* e outro no infravermelho próximo. Os picos chegam a variar dos comprimentos de onda de 700 – 726 nm e 803 – 810 nm.

Devido ao deslocamento dos picos de reflectância no infravermelho próximo, não foi possível aplicar a análise de remoção do contínuo espectral a um mesmo intervalo de banda dessa região que fosse comum a todas as curvas de reflectância. Apesar disso, foi verificado que as curvas, para as quais não foi possível aplicar a função linear de remoção do contínuo, foram coletadas em áreas sem plantas aquáticas submersas ou cujo dossel se encontrava a mais de 2 m de profundidade. Por esta razão, este intervalo de banda (700 – 810 nm) deve ser melhor investigado, pois apesar de não ter sido capaz de distinguir corretamente todas as curvas, algumas foram separadas com coerência.

A aplicação da análise derivativa nos dados de reflectância permitiu identificar feições associadas à presença de vegetação aquática submersa, apresentando os picos de reflectância máxima e mínima que podem ser associados às plantas imersas. No caso da primeira derivada, há experimentos apresentados na literatura que apontam os comprimentos de onda, por volta de 600 e 700 nm, como os que melhor explicam o comportamento espectral das macrófitas imersas, e esses puderam ser identificados nas curvas que possuíam a vegetação. A feição em 720 nm associada com a turbidez também foi bem definida, apesar desse ser baixa. Em relação aos resultados da segunda derivada, foi possível verificar padrões específicos que se comportam de forma diferente na presença ou ausência das plantas, sendo um pico máximo, em torno do comprimento de onda de 695 nm, e um pico mínimo por volta de 710 nm.

Apesar de ser altamente atenuada, a região espectral do infravermelho próximo é sensível a presença da vegetação aquática submersa em pontos em que a planta se encontra a menos de 1 m de profundidade. A partir de 1 m de altura de coluna d'água sobre dossel, as curvas de reflectância passam a não apresentar o segundo pico de reflectância em aproximadamente 800 nm. A essa profundidade, a derivada de primeira ordem não apresenta mais as feições positiva e negativa, bem definidas no infravermelho. Com o dossel das macrófitas há 2 m de distância da superfície, a radiação já foi bastante atenuada, fazendo com que as características definidas nas curvas de reflectância associadas à vegetação, como a absorção por volta do comprimento de onda de 670 nm e de espalhamento próximo a 700 nm, não sejam mais detectadas nas curvas de reflectância. Por estas razões, o uso de dados da

região do infravermelho próximo pode ser adequado em situações em que as plantas aquáticas submersas se encontram próximas à superfície da água.

Neste estudo, a região espectral que apresentou melhor desempenho na identificação da vegetação aquática submersa foi o intervalo de banda de 585 – 685 nm, associadas às luzes amarela e vermelha, do espectro visível. A partir dos resultados das classificações por análise de agrupamento, utilizando os parâmetros de banda do contínuo removido do intervalo de banda de 585 – 685 nm, e por *SAM*, adotando o mesmo intervalo espectral, foram obtidos resultados satisfatórios.

A classificação supervisionada utilizando o mapeamento por ângulo espectral (*SAM*) apresentou resultado superior em relação aos algoritmos de análise de agrupamento testados. O classificador, que se baseia na forma da curva espectral, conseguiu distinguir basicamente 4 dos principais ambientes analisados: pontos com vegetação aquática submersa, independente da altura de coluna d'água sobre o dossel; pontos sem plantas em local raso, com profundidade máxima de 1 m; pontos sem plantas imersas que apresentam profundidade máxima limite (6 m) ao desenvolvimento de macrófitas submersas; e pontos profundos (acima de 15 m) sem vegetação aquática submersa. Entretanto, assim como na análise de agrupamento, o *SAM* também não permitiu separar as curvas com plantas aquáticas submersas em classes que apresentassem alturas de coluna d'água sobre o dossel das macrófitas similares.

Um dos principais erros de classificação cometidos na análise de agrupamento foi gerar um grupo composto por curvas sem plantas aquáticas submersas em local com 6 m de profundidade e uma curva que apresentava uma altura de coluna d'água sobre o dossel de 3 m. Esse resultado mostra que a abordagem multivariada não pôde distinguir a contribuição da radiação do substrato de fundo e da vegetação aquática submersa, a partir dessa altura de coluna d'água sobre o dossel.

Um aspecto positivo observado em ambos os classificadores foi a separação em uma classe específica as curvas de reflectância coletadas em pontos sem macrófitas aquáticas submersas e profundos, ou seja, que não apresentam ou contribuem minimamente com a reflexão do substrato de fundo sobre a radiação registrada pelo sensor. Assim, dado que os algoritmos de classificação utilizados foram capazes de separar as curvas espectrais coletadas em pontos de 15 – 20 m de profundidade de coluna d'água, teoricamente, esses poderiam separar regiões de águas opticamente rasas e de águas opticamente profundas, utilizando dados hiperespectrais.

Apesar de não ter sido definido um modelo de regressão que explicasse de forma adequada o decréscimo da radiância através da coluna d'água, corrobora-se que a atenuação da radiação em relação à profundidade é definida por uma função exponencial, como afirma a literatura. Dentre os melhores resultados alcançados com a análise de regressão, foi observado que a aplicação de um modelo exponencial sobre o comprimento de onda em 700 nm apresentou um ótimo resultado na análise de variância, no entanto, não foi capaz de satisfazer os critérios de homoscedasticidade e independência dos resíduos.

Entretanto, a partir das medidas de radiância e irradiância, na direção ascendente e descendente, foi possível estimar algumas propriedades ópticas aparentes, como a reflectância de sensoriamento remoto, a reflectância de irradiância de subsuperfície e a reflectância de irradiâncias. Os espectros de reflectância de sensoriamento remoto se apresentam, aparentemente, melhor definidos nas mesmas feições associadas à presença de plantas aquáticas submersas presentes nas curvas de fator de reflectância.

Assim como a reflectância, a posição de aquisição das medidas radiométricas utilizadas na estimação da reflectância de sensoriamento remoto é logo acima da superfície, fazendo com que essa sofra maior influência de fatores externos como mudança de iluminação e ondulação da superfície da água do que as outras medidas estimadas com dados subaquáticos. Por esta razão, foi verificada em muitas curvas a presença de muito ruídos.

Ao comparar as curvas de reflectância de sensoriamento remoto com as de reflectância de irradiância de subsuperfície, nos mesmos pontos amostrais, verifica-se que as feições relacionadas à presença de vegetação aquática são menores nos espectros de reflectância de subsuperfície. No entanto, devido às poucas medidas dos dados de radiância e irradiância não é possível afirmar que a reflectância de sensoriamento remoto seja mais adequada na identificação de macrófitas submersas. Por outro lado, os espectros de reflectância de irradiância de subsuperfície apresentam poucos ruídos, podendo-se identificar melhor algumas feições de reflectância e absorção, o que por sua vez, poderia tornar essa medida mais apropriada.

Os espectros de razão de irradiâncias apresentaram comportamento espectral atípico, com alta reflectância da região do infravermelho próximo, com um pico máximo no comprimento de onda de 760 nm. Esse padrão espectral é observado nas curvas em que a irradiância ascendente e descendente foram coletadas a profundidades de coluna d'água superiores a 80 cm. A partir de profundidades maiores a 1,60 m, os valores de irradiância ascendente passam a ser maiores que os de irradiância descendente, em quase toda região do infravermelho próximo analisado. É provável que esse comportamento esteja associado a

processos de transferência radiativa sobre comprimentos de onda maiores, que ocorrem em locais de menor iluminação.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, envolvendo a aquisição de medidas de radiância e irradiância subaquáticas, recomenda-se a utilização de outro tipo de estrutura de apoio para as lentes. A utilização de um cabo metálico, não retrátil, limita muito o tamanho da estrutura, o que limita a profundidade útil de tomada dos dados. No entanto, uma estrutura grande dificulta o seu transporte em uma pequena embarcação. Neste trabalho, a profundidade máxima de coleta atingida foi de 2 m, sendo que seria possível adquirir medidas em locais mais profundos, uma vez que o comprimento do cabo de fibra óptica é de 5m. A inclinação de 30° da haste pode levar a mensuração da radiação de alvos subaquáticos diferentes conforme é alterada a profundidade da medida. Além disso, o elevado intervalo de tempo necessário para otimização do equipamento e aquisição dos dados torna desgastante a utilização desse tipo de estrutura. Neste sentido, o ideal seria utilizar um suporte de sustentação da lente que pudesse ser preso à embarcação. Seria interessante que parte do suporte pudesse ser submerso através da coluna d'água com o auxílio de cabos de sustentação flexíveis de fácil manuseio e transporte no barco.

É recomendada, também, a utilização de equipamentos que realizem a mensuração de propriedades ópticas aparentes e propriedades ópticas inerentes específicas que melhor caracterizam o ambiente aquático. A coleta de amostras de água para determinação da concentração de clorofila-a ou pigmentos totais e do total de sólidos em suspensão seria interessante para estudar a influência desses componentes opticamente ativos na resposta espectral de águas com plantas aquáticas submersas. A estimação dessas variáveis limnológicas também contribuiria para estimação da atenuação da radiação no meio aquático. A partir da obtenção dessas propriedades ópticas e variáveis limnológicas, os dados de radiância e irradiância, também, poderiam ser mais bem explorados.

Os dados de reflectância de sensoriamento remoto, de reflectância de irradiância de subsuperfície e razão de irradiâncias, estimadas a partir das medidas de radiância e irradiância, também devem ser melhor explorados e avaliados na identificação de vegetação aquática submersa. Os processos ópticos da luz na coluna d'água apresentam grande influência sobre essas propriedades ópticas aparentes, mas devem ser melhor compreendidos para explicar a elevada intensidade na região do infravermelho próximo, observada nos espectros de razão de irradiâncias.

Devido ao bom desempenho da classificação supervisionada por mapeamento por ângulo espectral, a formação de uma biblioteca de curvas espectrais de águas interiores

contribuiria imensamente no desenvolvimento de pesquisas sobre ambientes aquáticos. Essas assinaturas poderiam ser usadas como curvas de referência nas classificações utilizando *SAM*. Essa biblioteca também poderia ser usada na estimação das parcelas de contribuição dos componentes opticamente ativos e da vegetação aquática submersa sobre a radiação registrada, semelhante ao que é feito na análise de mistura espectral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 1987. p. 235 – 248.

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. n. 112. p. 4301 – 4317.

AES TIETÊ. **Nova Avanhandava**. 2009. Disponível em: <<http://www.aestiete.com.br/usinas/nova/>>. Acesso em: 19 mai. 2010.

ARRAUT, E. M.; RUDORFF, C. de M.; BARBOSA, C. C. F.; CARVALHO, J. C.; PEREIRA FILHO, W.; NOVO, E. M. L. de M. Estudo do comportamento espectral da clorofila e dos sólidos em suspensão nas águas do Lago Grande de Curuai (Pará), na época da seca, através de técnicas de espectroscopia de campo. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiânia, INPE, 2005. 2447-2456p.

BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento Remoto da dinâmica da circulação da água no sistema planície de Curuai/Rio Amazonas. 2005. 281f. **Tese** (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

BRANDO, V. E.; ANSTEE, J. M.; WETTLE, M.; DEKKER, A. G.; PHINN, S. R.; ROELFSEMA, C. A physics based retrieval and quality assessment of bathymetry from suboptimal hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 755 – 770, 2009.

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.

BUKATA, R. P.; JEROME, J. H.; KONDRATYEV, K. Y.; POZDNYAKOV, D. V. **Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters**. Boca Raton: CRC Press, 1995.

CARVALHO, J. C.; BARBOSA, C. C.; NOVO, E. M.; MANTOVANI, J. E.; MELACK, J.; PEREIRA FILHO, W. Applications of quantitative analysis techniques to monitor water quality of Curuai Lake, Brazil. **IEEE**. p. 2362 – 2364, 2003.

CAVENAGHI, A. L.; VELINI, E. D.; GALO, M. L. B. T.; CARVALHO, F. T.; NEGRISOLI, E.; TRINDADE, M. L. B.; SIMIONATO, J. L. A. Caracterização da qualidade de água e sedimento relacionados com a ocorrência de plantas aquáticas em cinco reservatórios da bacia do rio Tietê. **Planta Daninha**. Viçosa, v. 21, p. 43 – 52, 2003.

CHEN, Z.; CURRAN, P. J.; HANSOM, J. D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing of Environment**. v. 40, p. 67 – 77, 1992.

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.

DEKKER, A. G.; BRANDO, V. E.; ANSTEE, J. M.; PINNEL, N.; KUTSER, T.; HOOGEBOOM, E. J.; PETERS, S. ; PASTERKAMP, R.; VOS, C.; OLBERT, C.; MALTHUS, T. J. M. Imaging spectrometry of water. In: VAN DER MEER, F. D.; JONG, S. M. **Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. Chapter 11, p. 307 – 359.

DEKKER, A. G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing. 1993. 206f. **Thesis (PhD thesis)**. Academisch Proefschrift. Vrije Universiteit, Amsterdam.

DEMETRIADES-SHAH, T. H.; STEVEN, M. D.; CLARK, J. A. High resolution derivative spectra in remote sensing. **Remote Sensing of Environment**. v. 33, p. 55 – 64, 1990.

DOGAN, O. K.; AKYREK, Z.; BEKKLIOGLU, M. Identification and mapping of submerged plants in a shallow lake using Quickbird satellite data. **Journal of Environmental Management**. n. 90, p. 2138 – 2143, 2009.

DOXARAN, D.; FROIDEFOND, J. M.; LAVENDER, S.; CASTAING, P. Spectral signature of highly turbid waters – application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 149 – 161, 2002.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, 1998.

ENNES, R.; GALO, M. L. B. T.; TACHIBANA, V. M. Caracterização espectral da água do reservatório de Itupararanga, SP, a partir de imagens hiperespectrais Hyperion e análise derivativa. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 16, n. 1, p. 86 – 104, 2010.

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

FEITOSA, M. F.; NOGUEIRA, M. G.; VIANNA, N. C. Transporte de nutrientes e sedimentos no Rio Paranapanema (SP/PR) e seus principais tributários nas estações seca e chuvosa. In: NOGUEIRA, M. G.; HENRY, R.; JORCIN, A. (org.) **Ecologia de Reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata**. 2^a Edição. São Carlos: RiMa, 2006. cap. 18, p. 435 – 459.

GITELSON, A.; GARBUZOV, G.; SZILAGYI, F.; MITTENZWEY, K. H.; KARNIELI, A.; KAISER, A. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. **International Journal of Remote Sensing**. v. 14, n. 7, p. 1269 – 1295, 1993.

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. v.13, n.17, p. 3367 – 3373.

GOODIN, D. G.; HAN, L.; FRASER, R. N.; RUNDQUIST, C.; STEBBINS, W. A.; SCHALLES, J. F. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Vol. 59, n. 4, p. 505 – 510, 1993.

GREGORY, J. **Particles in water: properties and processes**. London: Taylor & Francis, 2006.

GÜRTLER, S.; EPIPHANIO, J. C. N.; LUIZ, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R. Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 57, v. 02, p. 162 – 167, 2005.

HAIR JR., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. Análise multivariada de dados. 6ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

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, 2003. n. 24. p. 859 – 864.

HAN, L. Spectral reflectance of *Thalassia testudinum* with varying depths. **IEEE**. p. 2123 – 2125, 2002.

HAN, L. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Tuscaloosa, v. 63, n. 6, p. 701 – 705, jul. 1997.

HAN, L.; RUNDQUIST, D. C.; LIU, L. L.; FRASER, R. N.; SCHALLES, J. F. The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment. **International Journal of Remote Sensing**. 1994, v. 15, n. 18, p. 3707 – 3718.

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, 2008. n. 112. p. 4034 – 4047.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ª Edição. São José dos Campos: Parênteses, 2009.

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

KIRK, J. T. O. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. **Limnol. Oceanogr.** n. 29, p. 350 – 356, 1984.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

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

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.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B., SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J.; GOETZ, A. F. H. The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**. v. 44, p. 145 – 163, 1993b.

KUSTER, T.; HIIRE, M.; METSAMAA, L.; VAHTMÄE, E.; PAAVEL, B.; APS, R. Field measurements of spectral backscattering coefficient of the Baltic Sea and boreal lakes. **Boreal Environment Research**, n.14, p. 305 – 312, Helsinki, 2009.

LEE, Z.; CASEY, B.; ARNONE, R.; WEIDMANN, A.; PARSONS, R.; MONTES, M. J.; GAO, B.; GOODE, W.; DAVIS, C. O.; DYE, J. Water and bottom properties of a coastal environment derived from Hyperion data measured from the EO-1 spacecraft platform. **Journal of Applied Remote Sensing**, vol. 1, p. 1 – 16, 2007.

LEE, Z.; CARDER, K. L.; CHEN, R. F.; PEACOCK, T. G. Properties of the water column and bottom derived from airborne visible infrared imaging spectrometer (AVIRIS) data. **Journal of Geophysical Research**, vol. 6, n. C6, p. 11639 – 11651, 2001.

LIU, Y.; ISLAM, M. A.; GAO, J. Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing. **Progress in Physical Geography**, v. 27, i. 1, p. 24 – 43, 2003.

LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; JUZILA, M. S. The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface waters. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 33, n. 1, p. 111 – 127, 1997.

LURTON, X. **An introduction to underwater acoustics: principles and applications**. Chichester: Praxis, 2002.

MALTHUS, T. J.; GEORGE, D. G. Airborne remote sensing of macrophytes in Cefni Reservoir, Anglesey, UK. **Aquatic Botany**. n. 58, p. 317 – 332, 1997.

MIGUENS, A. P. **Manual de Navegação**. Navegação: ciência e arte. Volume III – Navegação eletrônica e em condições especiais. Brasília, 2000.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

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

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and oceanography**. v. 22, n. 4, p. 709 – 722, 1977.

MOREL, A.; BRICAUD, A. Inherent optical properties of algal cells including picoplankton: theoretical and experimental results. **Can. Bull of Fish. and Aquat. Sc.** 214: Photosynthetic picoplankton; ed: T & Li, W.K.W. p. 521 – 559. 1986.

MORITORENA, S.; MOREL, A.; GENTILI, B. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: influence of water depth and bottom albedo. **Limnol. Oceanogr.** n. 39, p. 1689 – 1703, 1994.

NASCIMENTO, R. F. F.; ALCÂNTARA, E. H.; STECH, J. L.; KAMPEL, M. Uso de dados MERIS/ENVISAT em águas interiores. In: ALCÂNTARA, E.; NOVO, E. M. L. M.; STECH, J. L. **Novas tecnologias para o monitoramento e estudo de reservatórios hidrelétricos e grandes lagos**. São José dos Campos: Parênteses, 2011. Cap. 2. p. 81 – 117.

NOGUEIRA, M. G.; JORCIN, A.; VIANNA, N. C.; BRITTO, Y. C. T. Reservatórios em cascata e os efeitos na limnologia e organização das comunidades bióticas (fitoplâncton, zooplâncton e zoobentos) – um estudo de caso no Rio Paranapanema (SP/PR). In: NOGUEIRA, M. G.; HENRY, R.; JORCIN, A. (org.) **Ecologia de Reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata**. 2ª Edição. São Carlos: RiMa, 2006. cap. 4, p.83 – 125.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3ª Edição. São Paulo: Blucher, 2008.

OLIVEIRA, L. G. L.; PONZONI, F. J.; MORAES, E. C. Conversão de dados radiométricos orbitais por diferentes metodologias de caracterização atmosférica. **Revista Brasileira de Geofísica**. n. 27, v. 1, p. 121 – 133, 2009.

ORTH, R. J.; MOORE, K. A. Chesapeake Bay: an unprecedented decline in submerged aquatic vegetation. **Science**. v. 222, 1983.

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, 1993. n. 46. p. 110 – 118.

PHILPOT, W. D.; VIDACEK, A. Laser-induced fluorescence: limits to the remote detection of hydrogen ion, aluminum, and dissolved organic matter. **Remote Sensing of Environment**, v. 29, p. 51 – 65, 1989.

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.

ROTTA, L. H. S. Inferência espacial para mapeamento de macrófitas submersas – estudo de caso. 2011. 120f. **Dissertação** (Mestre em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente.

RUDORFF, C. M. Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrorradiômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos. 2006. 140p. **Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

RUNDQUIST D.C.; HAN L.H.; SCHALLES J.F.; PEAKE J.S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690nm. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. FEB, 1996. p. 195-200.

SABO-BOSCHI, L. Espacialização e quantificação volumétrica de plantas aquáticas submersas, a partir da integração de dados obtidos por sensores remotos. 2011.162 f. **Tese** (Doutor em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente.

SABOL, B. M.; KANNENBERG, J.; SKOGERBOE, J. G. Integrating acoustic mapping into operational aquatic plant management: a case study in Wisconsin. **Journal of Aquatic Plant Management**. 2009, p. 44 – 52, n. 47.

SABOL, B. M.; MELTON JR., R. E.; CHAMBERLAIN, R.; DOERING, P.; HAUNERT, K. Evaluation of a digital echo sounder system for detection of submersed aquatic vegetation. **Estuaries**. v. 25, n. 1, 2002. p. 133 – 141.

SABOL, B. M.; MELTON, R. E. **Development of an automated system for detection and mapping of submersed aquatic vegetation with hydroacoustic and global positioning system technologies, report I: the submersed aquatic vegetation early warning system (SAVEWS) – system description and user's guide (Version 1.0)**. USACE Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1990.

SENDACZ, S.; MONTEIRO JÚNIOR, A. J.; MERCANTE, C. T.; MORAES, J. F. Sistemas em cascata: concentrações e cargas de nutrientes no sistema produtor alto Tietê, São Paulo. In: NOGUEIRA, M. G.; HENRY, R.; JORCIN, A. (org.) **Ecologia de Reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata**. 2ª Edição. São Carlos: RiMa, 2006. cap. 17, p. 417 – 434.

STAVN, R. H.; WEIDEMANN, A. D. Shape factors, two-flow models, and the problem of irradiance inversion in estimating optical parameters. **Limnol. Oceanogr.** v. 34, n. 8, p. 1426 – 1441, 1989. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2837029>>. Acesso: 17 jun. 2011.

STECH, J. L.; ALCÂNTARA, E. H.; LORENZZETTI, J. A.; NOVO, E. M. L. M.; LIMA, I. B. T. Uso de tecnologia espacial para coleta automática de dados limnológicos e meteorológicos: aplicações nos reservatórios hidrelétricos de Manso e Corumbá. In: ALCÂNTARA, E.; NOVO, E. M. L. M.; STECH, J. L. **Novas tecnologias para o monitoramento e estudo de reservatórios hidrelétricos e grandes lagos**. São José dos Campos: Parênteses, 2011. Cap. 4.p. 163 – 191.

THOMAZ, S. M. Fatores que afetam a distribuição e o desenvolvimento de macrófitas aquáticas em reservatórios: uma análise em diferentes escalas. In: NOGUEIRA, M. G.; HENRY, R.; JORCIN, A. (org.) **Ecologia de Reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata**. 2ª Edição. São Carlos: RiMa, 2006. cap. 6, p. 165 – 181.

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

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

VALLEY, R. D.; DRAKE, M. T. **Accuracy and precision of hydroacoustic estimates of aquatic vegetation and the repeatability of whole-lake surveys: field tests with a commercial echosounder**. Minnesota Department of Natural Resources. 2005.

VELINI, E.D. Controle de plantas daninhas aquáticas. In: XXII Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas 2000, Foz de Iguaçu. **Anais XXII Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas**. v. 22 Foz de Iguaçu: SBCPD, 2000. p.137-147.

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

WILLIAMS, D. J.; RYBICKI, N. B.; LOMBANA, A. V.; O'BRIEN, T. M.; GOMEZ, R. B. Preliminary investigation of submerged aquatic vegetation mapping using hyperspectral remote sensing. **Environmental Monitoring and Assessment**, n. 81, p. 383 – 392, 2003.

YUAN, L.; ZHANG, L. Mapping large-scale distribution of submerged aquatic vegetation coverage using remote sensing. **Ecological informatics**, n. 3, p. 245 – 251, 2008.

YUHAS, R. H.; GOETZ, A. F. H.; BOARDMAN, J. W.; GREEN, R. O. Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the Spectral Angle Mapper (SAM) algorithm, **Summaries 3rd Annu. JPL Airborne Geoscience Workshop**, vol. 1, pp.147 - 149 , 1992.