



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14166-TDI/1083

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS DA PLANÍCIE
AMAZÔNICA POR MEIO DE DADOS DE REFLECTÂNCIA DO
SENSOR HYPERION/EO-1 E DE ESPECTRÔMETRO DE CAMPO
VISANDO À COMPREENSÃO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DOS
SEUS CONSTITUINTES OPTICAMENTE ATIVOS**

Conrado de Moraes Rudorff

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pela Dra. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo e Dr. Lênio Soares Galvão,
aprovada em 31 de março de 2006.

INPE
São José dos Campos
2006

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14166-TDI/1083

**ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DAS ÁGUAS DA PLANÍCIE
AMAZÔNICA POR MEIO DE DADOS DE REFLECTÂNCIA DO
SENSOR HYPERION/EO-1 E DE ESPECTRÔMETRO DE CAMPO
VISANDO À COMPREENSÃO DA VARIAÇÃO TEMPORAL DOS
SEUS CONSTITUINTES OPTICAMENTE ATIVOS**

Conrado de Moraes Rudorff

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pela Dra. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo e Dr. Lênio Soares Galvão,
aprovada em 31 de março de 2006.

INPE
São José dos Campos
2006

728.771.7 (811)

RUDORFF, C. M.

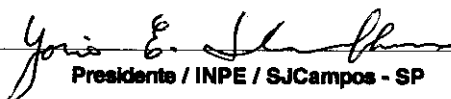
Estudo da composição das águas da Planície Amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos / C. M. Rudorff. – São José dos Campos: INPE, 2006.

140p.; (INPE-14166-TDI/1083).

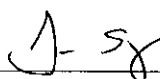
1.Amazônia. 2.Planície de inundação. 3.Qualidade da água. 4.Sensoriamento remoto. 5.Imagens de satélite. 6.Reflectância. 7.Espectroscopia. 8.Análise de mistura espectral. 9.Diferenciação. I.Título.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

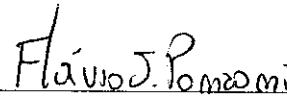
Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

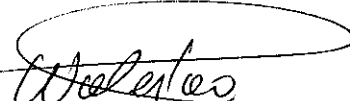
Dr. Cláudio Clemente de Faria Barbosa


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Waterloo Pereira Filho


Convidado(a) / UFSM / Santa Maria - RS

Aluno (a): **Conrado de Moraes Rudorff**

São José dos Campos, 31 de março de 2006

“mas aqueles que contam com o Senhor renovam suas forças; ele dá-lhes asas de águia. Correm sem se cansar, vão para a frente sem se fatigar”.

ISAIAS 40;31

*A minha família,
HELOISA,
BERNARDO,
FREDERICO e
NATÁLIA.*

AGRADECIMENTOS

À Dra. Evlyn Novo pelas suas orientações que contribuíram enormemente para a minha formação acadêmica e como pessoa. Seus esforços despendidos para prover as condições ideais para a realização deste trabalho foram ilimitados. De forma especial, sou grato a ela pela oportunidade que tive de partilhar experiências pessoais de vida e descobrir nela uma pessoa maravilhosa cheia de riquezas interiores e tremendamente iluminada por Deus.

Ao Dr. Lênio Galvão por quem acumulo cada vez mais admiração. Sua dedicada orientação e experiência em análises de imagens hiperspectrais foram fundamentais para que o trabalho fosse realizado com o devido rigor científico.

A meus pais e minha avó pelo amor e amparo doados sempre com prontidão. As ricas conversas do dia-a-dia com meu pai muito me ensinaram e indiretamente muito contribuíram ao longo da realização deste mestrado.

A meus queridos irmãos pelo apoio, carinho e alegria contagiante que trazem no coração e que nunca me deixaram desanimar diante dos momentos de dificuldade.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudar e utilizar suas instalações dentro de um ambiente de trabalho agradável e favorável para a realização de um bom trabalho. À ADC pelos momentos de descontração proporcionados na atividade esportiva que em muito ajudou na manutenção do equilíbrio entre a atividade intelectual e física.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do INPE pelo conhecimento compartilhado, especialmente, por meio das disciplinas ministradas.

Ao amigo Dr. Cláudio Barbosa por compartilhar informação, conhecimento e experiência que ajudaram a esclarecer diversas questões do trabalho.

À Dra. Elisabete Moraes e Dr. José Luiz Stech pelas instruções e apoio técnico no uso do equipamento de medidas radiométricas de campo.

A todos aqueles que colaboraram para tornar possível a viagem para a Amazônia. Ao Dr. Waterloo Filho e Dra. Maycira Costa, pelo conhecimento passado durante a realização da campanha de coleta de dados em campo e pela oportunidade de compartilhar com eles idéias que contribuíram na realização deste trabalho. Aos demais amigos pesquisadores e funcionários que estavam a bordo do barco Eloin, por todo suor e risadas partilhadas. Ao comandante do barco Eloin, Sr. Flaurindo, pelos seus cuidados em fazer tudo para facilitar o trabalho e garantir a segurança durante a viagem, sem deixar de lado sua calorosa amizade acessível em pouco tempo de convívio.

Ao Instituto Internacional de Ecologia - IIE por ter realizado as análises dos parâmetros de qualidade da água, especialmente ao meu amigo Deyves.

Aos projetos LBA e GEOMA, pelo financiamento de materiais e custos de viagem.

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa de mestrado.

À minha amiga Etel juntamente com a equipe da Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do INPE por todo apoio e encorajamento ao longo deste mestrado. Especial agradecimento também à Secretaria da DSR que sempre esteve pronta para ajudar e facilitar em todo apoio necessário para a realização do trabalho.

À minha querida namorada Camila e aos meus amigos e companheiros de mestrado pelas partilhas não só nos momentos divertidos, mas também nos de peleja.

Finalmente, e acima de todos, agradeço a Deus por ter-me dado a oportunidade de, por meio da ciência, avançar um pouquinho no conhecimento das maravilhas de Sua criação. Sou grato pelas pessoas maravilhosas que Ele colocou em meu caminho no decorrer destes dois anos inesquecíveis de minha vida. Agradeço pelas bênçãos derramadas e pela sua providência infalível que chegou a ponto de mover nuvens para que a imagem usada nesse estudo fosse adquirida com sucesso.

RESUMO

Duas abordagens metodológicas foram avaliadas para o estudo da reflectância de constituintes opticamente ativos por meio de imagens hiperespectrais do sensor orbital Hyperion/EO-1: a) Modelo Linear de Mistura Espectral; e b) análise derivativa espectral. Duas imagens Hyperion adquiridas sobre a área de estudo situada à montante da confluência entre os rios Amazonas e Tapajós foram analisadas, visando a compreensão da dinâmica sazonal da composição das águas da planície de inundação Amazônica. A primeira imagem foi adquirida no dia 16 de setembro de 2001, durante o período de vazante em que a água escoava no sentido dos lagos da planície para o rio Amazonas, devido à diminuição de seu nível. A segunda imagem foi adquirida no dia 23 de junho de 2005, no final do período de cheia. Uma campanha de campo foi realizada entre 23 e 29 de junho de 2005 para coletar dados radiométricos e limnológicos quase simultâneos à aquisição desta imagem. Ambas as imagens foram pré-processadas visando eliminar faixas de pixels anômalos e foram convertidas de valores de radiância para reflectância de superfície, portanto, corrigindo-se os efeitos de absorção e espalhamento atmosféricos. Um procedimento sequencial das técnicas Fração Mínima de Ruído (MNF), Índice de Pureza de Pixel (PPI) e visualização do espaço de atributos n-dimensional gerado entre as bandas MNF foi empregado para selecionar membros de referência, no intervalo espectral 457-885 nm. Foi composto um conjunto único de membros de referência para representar as seguintes massas de águas espectralmente distintas: água clara, matéria orgânica dissolvida, sedimentos em suspensão; e fitoplâncton. O Modelo Linear de Mistura Espectral mapeou cada cena em termos das abundâncias fracionais sub-pixels dos quatro MRs. Uma análise temporal permitiu verificar alterações relativas na composição da água, tendo sido observada uma tendência geral de aumento nas concentrações de sedimentos em suspensão e fitoplâncton na planície de inundação para o período de vazante. A partir das medidas de campo e da imagem Hyperion obtida em 2005, durante o período de cheia, foram calculados coeficientes de correlação dos dados de reflectância e de primeira derivada espectral com as concentrações dos constituintes opticamente ativos. Por meio de ajustes de modelos empíricos observou-se que, a primeira derivada espectral: em 711,7 nm, explicou 80,9% da variação da concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão (mg l^{-1}); e em 691,4 nm, explicou 68,3% da variação na concentração da clorofila-*a* ($\mu\text{g l}^{-1}$). Os dois métodos empregados demonstraram potenciais peculiares para caracterizar a composição das águas opticamente complexas na Amazônia.

STUDY OF AMAZON FLOODPLAIN WATER COMPOSITION USING HYPERION/EO-1 AND FIELD REFLECTANCE DATA FOR THE COMPREHENSION OF TEMPORAL VARIABILITY OF OPTICALLY ACTIVE CONSTITUENTS

ABSTRACT

Two methodological approaches were evaluated to study the reflectance of optically active constituents using hyperspectral imagery of EO-1 Hyperion orbital sensor: a) Linear Spectral Mixture Model; and b) derivative analysis. Two Hyperion images acquired over an area located upstream of the confluence between the Amazon and the Tapajós rivers were analysed, looking towards the comprehension of the seasonal dynamic of the Amazon floodplain's water composition. The first image was acquired September 16, 2001, during the period of the outflow of water from the floodplain lakes to the Amazon River, due to the lowering of its level. The second image was acquired June 23, 2005, at the end of the high water period. A field campaign was carried out between June 23 and 29, 2005 to collect radiometric and limnological data almost simultaneously the acquisition of this image. Both images were pre-processed to remove stripes of abnormal pixels and were converted from radiance to surface reflectance values, thus, correcting the effects of atmospheric absorption and scattering. A sequential procedure with the techniques of Minimum Noise Fraction (MNF), Pixel Purity Index (PPI) and n-dimensional visualization of the MNF feature space was employed to select endmembers, within the spectral range of 457-885 nm. A single set of endmembers was gathered to represent the following spectrally unique water masses: clear-water; dissolved organic matter; suspended sediments; and phytoplankton. The Linear Spectral Mixture Model mapped each scene in terms of the sub-pixels fractional abundances of the four endmembers. A temporal analysis allowed to verify the relative alterations in water composition, observing a general tendency of the increase in suspended sediment and phytoplankton concentrations along the floodplain towards the outflow period. From field and Hyperion image measurements obtained in 2005, during the high water period, correlation coefficients of the reflectance and first spectral derivative with the concentrations of optically active constituents were determined. By means of empirical model fits it was observed that, the first spectral derivative: in 711.7 nm, explained 80.9% of the variation of suspended inorganic sediments concentration (mg l^{-1}); and in 691.9 nm, explained 68.3% of the variation of chlorophyll-*a* concentration ($\mu\text{g l}^{-1}$). The two methods applied demonstrated peculiar potentials to characterize the composition of optically complex Amazon waters.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

LISTA DE SIMBOLOS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	29
1.1 Organização do Documento	32
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1 Ambiente Aquático da Planície de Inundação Amazônica	33
2.1.1 Histórico Geológico	33
2.1.2 Clima e Hidrologia	34
2.1.3 Condições Hidroquímicas	35
2.1.4 Processos de Sedimentação e Erosão	37
2.1.5 Produção Primária	38
2.1.6 Dinâmica de Circulação Hídrica	39
2.2 Propriedades Ópticas de Águas Naturais	42
2.2.1 Constituintes Opticamente Ativos	45
2.2.1.1 Matéria Orgânica Dissolvida	46
2.2.1.2 Fitoplâncton	46
2.2.1.3 Sedimentos em Suspensão	48
2.3 Sensoriamento Remoto Hiperespectral	48
2.4 Correção Atmosférica	50
2.5 Métodos de Estimativa de Constituintes Opticamente Ativos	51
2.6 Análise Derivativa	53
2.7 Modelo Linear de Mistura Espectral	55
2.7.1 Seleção dos Membros de Referência	57
2.7.1.1 Transformação Fração Mínima de Ruído	59
2.7.1.2 Índice de Pureza de Pixel	61
2.7.1.3 Visualização n-Dimensional	61
2.7.1.4 Identificação dos Membros de Referência	62
2.7.2 Algoritmo do Modelo Linear de Mistura Espectral	63
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 Seleção da Área de Estudo e dos Períodos Hidrológicos para Análise Hiperespectral	65
3.1.1 Escolha dos Períodos Hidrológicos	66
3.1.2 Aquisição das Imagens Hyperion/EO-1	68
3.2 Pré-Processamento das Imagens Hyperion/EO-1	70
3.2.1 Remoção de Pixels Anômalos	70
3.2.2 Correção Atmosférica e Geométrica	71

3.2.3 Criação de Máscara para Isolar os Corpos D'água	72
3.3 Modelo Linear de Mistura Espectral.....	72
3.3.1 Seleção dos Membros de Referência	72
3.3.2 Mapeamento das Massas de Água Espectralmente Distintas	73
3.3.3 Análise da Dinâmica Temporal entre os Períodos de Cheia e Vazante.....	74
3.4 Coleta de Dados de Campo no Período de Cheia	74
3.5 Análise Espectral da Imagem Hyperion/EO-1 adquirida no Período de Cheia	77
3.5.1 Análise Derivativa por Aproximação Simétrica	77
3.6 Modelo Empírico para Inferência de Constituintes Opticamente Ativos.....	78
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1 Modelo Linear de Mistura Espectral.....	79
4.1.1 Membros de Referência da Imagem Hyperion do Período de Cheia	79
4.1.2 Membros de Referência da Imagem Hyperion do Período de Vazante.....	83
4.1.3 Seleção Final dos Membros de Referência.....	88
4.1.4 Mapeamento Espectral da Imagem Hyperion/EO-1 do Período de Cheia	89
4.1.5 Mapeamento Espectral da Imagem Hyperion/EO-1 do Período de Vazante	97
4.2 Dinâmica Temporal entre os Períodos de Cheia e Vazante	99
4.2.1 Rio Tapajós.....	100
4.2.2 Rio Amazonas.....	102
4.2.3 Lago Aramaná.....	104
4.2.4 Lago Furo do Aritapera	107
4.2.5 Norte do Lago Curumu	109
4.2.6 Sul do Lago Curumu.....	111
4.2.7 Lago Juruparipucu	112
4.3 Análise Espectral da imagem Hyperion/EO-1 Adquirida no Período de Cheia.....	115
4.3.1 Reflectância Espectral	115
4.3.2 Análise Derivativa	118
4.4 Modelo Empírico para Inferência da Composição da Água por meio da Imagem Hyperion do Período de Cheia	121
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
APÊNDICE A – PARÂMETROS DE ÁGUA MEDIDOS EM LABORATÓRIO.....	139
A.1 Método da Clorofila- <i>a</i>	139
A.2 Método para Análise de Sedimentos em Suspensão	139
A.3 Método para Determinação de Carbono Orgânico e Inorgânico Dissolvido	140

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Hidrógrafa registrada em Óbidos.	35
2.2 - Água do rio Amazonas (A) se misturando com águas da planície de inundação (B) dentro da várzea do Lago Grande de Curuai.	37
2.3 - Habitat com elevada produção de biomassa na planície de inundação do rio Amazonas, situado próximo à cidade de Alenquer (foto registrada 28-06-2005)..	39
2.4 - Composições coloridas normais (RGB-321) do sensor ETM ⁺ /Landsat7, adquiridas sobre a região central da planície de inundação do rio Amazonas, entre 2001 e 2002. O conjunto de imagens demonstra as variações sazonais sobre a composição da água. As setas verdes apontam para fluorescências de fitoplâncton. Curvas hidrógrafas, indicando a data de aquisição de cada cena ao longo do pulso de inundação, são mostradas na porção inferior da figura.	41
2.5 - Fluxos de radiação detectados por sensores remotos sobre sistemas aquáticos.	42
2.6 - Variação do coeficiente <i>a</i> da água pura, de Constituintes Opticamente Ativos e a absorção total resultante; Variação do coeficiente <i>b</i> para água pura e fitoplâncton.	46
2.7 - Exemplo de reflectância e a primeira derivada espectral.	55
2.8 - Exemplos conceituais de escalas de mistura em um pixel: puro (esquerda); de mistura microscópica (centro); e de mistura macroscópica (direita).	56
2.9 - Procedimento para seleção de Membros de Referência.	58
2.10 - Exemplos de autovalores observados pela transformação MNF para dados SWIR dos sensores Hyperion e AVIRIS, adquiridos em Cuprite, NV.	60
2.11 - Exemplos de bandas MNF transformadas de dados SWIR do AVIRIS em Cuprite. As bandas dispostas no sentido da esquerda para direita correspondem à seguinte ordem MNF: 1; 5; 10; e 20.	60
2.12 - Exemplos de bandas MNF transformadas de dados SWIR do Hyperion em Cuprite. As bandas dispostas no sentido da esquerda para direita correspondem à seguinte ordem MNF: 1; 5; 10; e 20.	60
2.13 - Exemplo de projeção dos Membros de Referência (A-G) compondo os vértices de uma forma geométrica da dispersão dos pontos de mistura espectral.	62
3.1 - Esquema da metodologia de trabalho.	64
3.2 - Localização geográfica da área de estudo. A faixa de imageamento do Hyperion é indicada pelas linhas tracejadas.	66
3.3 - Direção do fluxo durante cada período considerado relevante para estudo da dinâmica de circulação e composição da água no sistema rio Amazonas/planície de inundação.	67
3.4 - Imagens Hyperion/EO-1 adquiridas sobre a planície de inundação em 23/06/2005 (esquerda) e 16/09/2001 (direita) e usadas para representar os períodos hidrológicos de cheia e vazante, respectivamente. Imagens em composição colorida normal: 640,5 nm (vermelho); 548,9 nm (verde); 457,3 nm (azul). A hidrógrafa mensal média registrada próximo à área de estudo também é mostrada.	69

3.5 - Presença de ruído na forma de faixas escuras verticais observadas na imagem da Banda 10 (447 nm) da cena EO1H-16/09/2001.	70
3.6 - Imagem Hyperion/EO-1 adquirida no período de cheia (23/06/2005), em composição colorida normal: 640,5 nm (vermelho); 548,9 nm (verde); 457,3 nm (azul). Nome dos corpos d'água situados ao longo da PIAS e localização das estações de coleta (EC) de dados em campo.	75
4.1 - Variação nos autovalores resultantes da aplicação da técnica MNF sobre a imagem Hyperion do período de cheia.	79
4.2 - Transformação MNF realizada a partir dos valores de reflectância de superfície de 43 bandas do sensor Hyperion posicionadas no VNIR. A imagem foi obtida no período de cheia (23/06/2005). No sentido da esquerda para direita, estão dispostas as seguintes bandas MNF: 1; 2; 3; 4; 5; 10 e 20.	80
4.3 - Visualizador n-Dimensional: espaço de atributos gerado entre as bandas MNF 1, 2, 3 e 6 para os 9.302 pixels indicados pela técnica PPI. Os Membros de Referência selecionados estão identificados na nuvem de dispersão.	81
4.4 - Localização dos pixels selecionados como Membros de Referência na imagem Hyperion do período de cheia (23/06/2005). Os espectros de reflectância média são ilustrados.	82
4.5 - Variação nos autovalores resultantes da aplicação da técnica MNF sobre a imagem Hyperion do período de vazante.	84
4.6 - Transformação MNF realizada a partir dos valores de reflectância de superfície de 43 bandas do sensor Hyperion posicionadas no VNIR. A imagem foi obtida no período de vazante (16/09/2001). No sentido da esquerda para direita, estão dispostas as seguintes bandas MNF 1; 2; 3; 4; 5; 10 e 20.	85
4.7 - Visualizador n-Dimensional: espaço de atributos gerado entre as bandas MNF 1, 2 e 3 para os 9.964 pixels indicados pela técnica PPI. Os Membros de Referência selecionados estão identificados na nuvem de dispersão.	86
4.8 - Localização dos pixels selecionados como Membros de Referência na imagem Hyperion do período de vazante (16/09/2001). Os espectros de reflectância (média de três pixels) são ilustrados.	87
4.9 - Conjunto final de Membros de Referência utilizados para a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral.	89
4.10 - (a) Imagem Hyperion/EO-1 adquirida no período de cheia (23/06/2005), em composição colorida normal: 640,5 nm (vermelho); 548,9 nm (verde); 457,3 nm (azul). Imagens resultantes da aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral, representando as abundâncias fracionais: (b) $f_{\text{água clara}}$; (c) f_{MOD} ; (d) f_{SS} ; e (e) $f_{\text{fitoplâncton}}$. Pixels mais claros representam maiores abundâncias. A imagem de erro RMS do ajuste do modelo é mostrada em (f). O círculo vermelho mostra que o erro do mapeamento aumentou sobre áreas afetadas por brumas.	90
4.11 - Correlogramas entre as abundâncias fracionais dos Membros de Referência e medidas de transparência da água (profundidade <i>Secchi</i> e turbidez) e de concentrações de Constituintes Opticamente Ativos.	92
4.12 - Relação entre COD, indicador da matéria orgânica dissolvida, e os valores de abundância fracional do Membro de Referência de matéria orgânica dissolvida. .	93
4.13 - Relações entre o conteúdo de clorofila- <i>a</i> e os valores de abundância fracional do Membro de Referência fitoplâncton.	94

4.14 - Relações entre o conteúdo de sedimentos inorgânicos em suspensão (SIS) e os valores de abundância fracional do Membro de Referência sedimentos em suspensão.	95
4.15 - Correlogramas entre as abundâncias fracionais dos Membros de Referência e medidas que expressam parâmetros não ópticos de qualidade da água.....	96
4.16 - (a) Imagem Hyperion/EO-1 adquirida no período de vazante (16/09/2001), em composição colorida normal: 640,5 nm (vermelho); 548,9 nm (verde); 457,3 nm (azul). Imagens resultantes da aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral, representando as abundâncias fracionais: (b) $f_{\text{água clara}}$; (c) f_{MOD} ; (d) f_{SS} ; e (e) $f_{\text{fitoplâncton}}$. Pixels mais claros representam maiores abundâncias. A imagem de erro RMS do ajuste do modelo é mostrada em (f).	97
4.17 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante sobre o rio Tapajós, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-43 está indicada na figura.	101
4.18 - Variação temporal de reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-43 no rio Tapajós.	101
4.19 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre o rio Amazonas, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-30 está indicada na figura.	103
4.20 - Variação temporal de reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-30 no rio Amazonas.....	103
4.21 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre o lago Aramanaí, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-25 está indicada.	106
4.22 - Variação temporal de reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-25 no lago Aramanaí.	106
4.23 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre o lago Furo do Aritapera, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-20 está indicada.....	107
4.24 - Variação temporal de reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-20 no lago do Furo do Aritapera.	108
4.25 - Espectros de transição de água barrenta para solo. Imagem Hyperion da vazante (direita). Os pontos vermelhos se referem à posição do pixel onde o espectro foi amostrado na imagem.	109
4.26 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre a região norte do Lago Curumu, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-01 está indicada na figura.	109

4.27 - Variação temporal da reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-01 na região norte do lago Curumu.	110
4.28 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre a região sul do lago Curumu, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-07 está indicada.	111
4.29 - Variação temporal da reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-07 na região sul do lago Curumu.	112
4.30 - Vegetação no entorno de um lago de água com bastante matéria orgânica dissolvida: igapó (esquerda) e “tapagem” conhecida localmente por arroz selvagem (direita).	113
4.31 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre o lago Juruparipucu, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-10 está indicada.	113
4.32 - Variação temporal da reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre o lago Juruparipucu.	114
4.33 - Espectros de reflectância: medidos nas estações de coleta (esquerda) durante a campanha de campo realizada entre 23/06/05 e 29/06/05; e espectros extraídos de pixels da imagem Hyperion (direita) adquirida 23/06/2005, geograficamente correspondentes às estações de coleta (ver Figura 3.6).	117
4.34 - Correlogramas obtidos entre as medidas de reflectância e parâmetros limnológicos selecionados: dados de campo (esquerda); e dados do sensor Hyperion (direita).	117
4.35 - Efeito de aplicação de filtro de média de três pontos sobre o espectro de campo medido na estação EC-43.	118
4.36 - Efeito de aplicação de filtro de média de três pontos sobre o espectro medido pelo sensor Hyperion na estação EC-43.	119
4.37 - Espectros resultantes da aplicação da primeira derivada (DR_1) sobre: dados de campo (esquerda); e dados de pixels Hyperion (direita) geograficamente correspondentes às estações de coleta (ver Figura 3.6).	120
4.38 - Correlogramas obtidos entre a primeira derivada espectral (DR_1) e medidas de Constituintes Opticamente Ativos: dados de campo (esquerda); e dados Hyperion (direita).	120
4.39 - Modelo empírico para estimar concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão no período de cheia a partir de DR_{671}	122
4.40 - Modelo empírico para estimar concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão no período de cheia a partir de DR_{711}	123
4.41 - Modelo empírico para estimar concentração de clorofila- <i>a</i> no período de cheia a partir de DR_{691}	123
4.42 - (a) Variações na concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão (SIS em mg l^{-1}) na imagem Hyperion do período de cheia (23/06/2005), obtida a partir da equação de regressão da Figura 4.40; (b) Imagem de abundância fracional de	

sedimentos em suspensão (f_{ss}), resultante do Modelo Linear de Mistura Espectral.	125
4.43 - (a) Variações na concentração de clorofila ($Chl-a$ em $\mu g\ l^{-1}$) na imagem Hyperion do período de cheia (23/06/2005), obtida a partir da equação de regressão da Figura 4.41; (b) Imagem de abundância fracional de fitoplâncton ($f_{fitoplâncton}$), resultante do Modelo Linear de Mistura Espectral.	126

LISTA DE TABELAS

2.1 - Comprimento de onda de absorção dos pigmentos.	47
2.2 - Especificações do conjunto de dados da imagem Hyperion.	50
3.1 - Datas identificadas por Barbosa (2005) para aquisição de dados representativos aos quatro períodos hidrológicos.	67
3.2 - Informações sobre condições de aquisição das imagens Hyperion.	70
4.1 - Estatísticas descritivas sobre os resultados de abundâncias fracionais para a imagem Hyperion da cheia.	91
4.2 - Estatísticas descritivas sobre os resultados de abundâncias fracionais para a imagem Hyperion da vazante.	98
4.3 - Parâmetros da água medidos em campo no período de cheia nas regiões escolhidas para análise temporal.	100
4.4 - Estatísticas descritivas dos parâmetros de medição de Constituintes Opticamente Ativos nas 44 estações de amostragem em campo.	115

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACORN	- <i>Atmospheric CORrection Now</i>
AVIRIS	- <i>Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer</i>
CE	- Condutividade Elétrica
COA	- Constituinte Opticamente Ativo
COD	- Carbono Orgânico Dissolvido
CID	- Carbono Inorgânico Dissolvido
Cl- <i>a</i>	- Clorofila- <i>a</i>
DR ₂	- Primeira Derivada Espectral
EO-1	- <i>Earth Observing One</i>
EC	- Estação de Coleta
ETM+	- <i>Enhanced Thematic Mapper</i>
GIFOV	- Campo Instantâneo de Visada no Terreno (<i>Ground Instantaneous Field of View</i>)
IVP	- Infravermelho Próximo
L ₂	- Radiância espectral
MOD	- Matéria Orgânica Dissolvida
MNF	- Fração Mínima de Ruído (<i>Minimum Noise Fraction</i>)
MLME	- Modelo Linear de Mistura Espectral
MR	- Membro de Referência
NTU	- Unidade Nefelométrica de Turbidez
OD	- Oxigênio Dissolvido
PIAS	- Planície de Inundação Alenquer-Santarém
PPI	- Índice de Pureza de Pixel (<i>Pixel Purity Index</i>)

R _?	- Reflectância
SIS	- Sedimentos Inorgânicos em Suspensão
SOS	- Sedimentos Orgânicos em Suspensão
SNR	- Relação Sinal/Ruído (<i>Signal to Noise Ratio</i>)
SR	- Sensoriamento Remoto
SS	- Sedimentos em Suspensão
SWIR	- Infravermelho de Ondas Curtas (<i>Short Wave Infrared</i>)
TM	- <i>Thematic Mapper</i>
VIS	- Visível
VNIR	- Visível-Infravermelho-Próximo (<i>Visible-Near-Infrared</i>)
ZTAT	- Zona de Transição Aquática-Terrestre

LISTA DE SIMBOLOS

$f_{\text{água clara}}$	- abundância fracional do Membro de Referência de água clara
f_{MOD}	- abundância fracional do Membro de Referência de matéria orgânica dissolvida
f_{SS}	- abundância fracional do Membro de Referência de sedimentos em suspensão
$f_{\text{fitoplâncton}}$	- abundância fracional do Membro de Referência de fitoplâncton
?	- Comprimento de onda

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica Amazônica é a maior do planeta Terra sendo composta por uma rede hidrográfica de rios largos e volumosos acompanhados de uma extensa planície de inundação. O Amazonas é o rio principal e o seu nível varia em média 10 m em Manaus, entre o período de cheia e de água baixa. Esta dinâmica do rio é de importância fundamental para os padrões de sucessão da floresta inundável e povoamento de espécies na região Amazônica (Tundisi, 1994). A planície de inundação do Amazonas é formada por um sistema complexo de canais, rios, lagos, ilhas e barreiras que permanece em constante modificação por sedimentação e transporte de sedimentos em suspensão. Os mecanismos de funcionamento rio/várzea têm sido estudados por diversos autores (p.ex., Barbosa, 2005; Junk e Fruch, 1985; Sioli, 1984; Tundisi, 1994). A mudança do nível da água e a transição anual das fases aquáticas e terrestres apresentam uma série de impactos sobre as plantas e animais aquáticos e terrestres que precisam se adaptar aos períodos de alagamento e estiagem (Junk, 1997; Tundisi, 1994).

A composição da água é um aspecto fundamental a ser estudado para entender o funcionamento dos processos dinâmicos que ocorrem entre os ecossistemas aquáticos e terrestres. A primeira classificação das águas Amazônicas foi realizada por Sioli em 1950 (Sioli, 1984), baseando-se principalmente em características ópticas (em termos da cor). Essa classificação agrupou as águas amazônicas em três grandes grupos: as *águas pretas*, com alto conteúdo de componentes húmicos; as *águas brancas*, com alto conteúdo de partículas em suspensão; e as *águas claras*, com baixa turbidez e pequeno conteúdo de materiais em suspensão e substâncias húmicas. Segundo Sioli (1984), as características ópticas destas três classes de água estão associadas às propriedades geológicas, geoquímicas e petrográficas de suas regiões de origem, assim como, às atividades biológicas que nelas ocorrem. No entanto, a influência do regime de cheias na Amazônia sobre a qualidade da água é intensa, sendo capaz de causar grandes alterações nas concentrações das substâncias que controlam a cor da água ao longo das

estações do ano. Além disso, há de se considerar que existem outras fontes de água para a planície de inundação cuja importância relativa varia ao longo do ano de forma sincrônica ou diacrônica com a flutuação do pulso de inundação em função das variáveis climáticas que atuam regionalmente (precipitações) ou localmente (ventos), conforme discutido em Barbosa (2005).

O Sensoriamento Remoto (SR) tem contribuído enormemente para estudar os mais diversos ambientes naturais espalhados pelo mundo, ajudando a ampliar a compreensão das estruturas ecossistêmicas e suas interações. Um dos principais interesses no uso de imagens de SR em ambientes aquáticos é verificar a variação espacial e temporal da qualidade da água, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água. A tentativa de realizar esta tarefa para as águas da planície de inundação Amazônica, onde ocorrem significativas mudanças hídricas sazonais, tem sido um grande desafio encarado por alguns autores (p.ex., Barbosa, 2005; Barbosa, 2003; Carvalho, 2003; Martinez et al., 2004; Novo et al., 2004; Novo e Shimabukuro, 1994; Novo et al., 1995; Novo et al., 2005; Rudorff et al., 2005).

Os corpos d'água naturais apresentam substâncias em suspensão e dissolvidas na coluna d'água com concentrações variáveis que interferem nas suas propriedades ópticas. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes e matéria orgânica dissolvida são os principais Constituintes Ópticamente Ativos (COAs) na coluna d'água. Os efeitos conjuntos dos COAs sobre as propriedades espectrais de águas continentais, em que cada um apresenta uma variação espectral particular, têm sido amplamente discutidos na literatura (p.ex., Arst, 2003; Bukata, 2000; Kirk, 1994). Este conhecimento científico aliado ao desenvolvimento de sensores capazes de registrar com maior detalhe os alvos na superfície terrestre e de métodos que permitem a extração de informações cada vez mais específicas dos dados coletados, tem aberto o caminho para que a qualidade da água seja estudada por meio de técnicas de SR. No entanto, ainda restam limitações tecnológicas e metodológicas que restringem a obtenção de medidas com precisão satisfatória para águas continentais e costeiras opticamente complexas (Arst, 2003). As limitações tecnológicas estão relacionadas às características dos instrumentos em termos de resoluções espaciais, espectrais e

radiométricas. As dificuldades metodológicas estão principalmente relacionadas à questão de como isolar a componente da reflectância da água, que traz a informação sobre os COAs, dos demais fluxos de radiação detectados pelos sensores. O Hyperion, lançado a bordo do satélite *Earth Observing One* (EO-1) em Novembro de 2000, é o primeiro sensor orbital hiperespectral que permite a aquisição de imagens em 242 bandas espectrais (10 nm de largura cada) posicionadas nas faixas do visível (VIS), do infravermelho próximo (IVP) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR). Este sensor não foi projetado para o estudo da água, pois sua relação sinal/ruído (SNR de 160:1) é relativamente baixa. No entanto, pesquisas preliminares já demonstraram sua utilidade no estudo de habitat bentônico (Kruse, 2003) e no mapeamento da qualidade de águas costeiras (Vittorio e Dekker, 2003).

De fato, há a necessidade de avaliar o desempenho dos dados hiperespectrais orbitais aplicados aos mais diversos ambientes aquáticos. Nesse contexto, o principal objetivo deste estudo foi avaliar a utilização de imagens hiperespectrais obtidas pelo sensor Hyperion/EO-1, na faixa espectral 457-885 nm, para a caracterização e mapeamento das águas amazônicas e para o monitoramento espectral das mudanças em sua composição, impostas pelo pulso de inundação em dois períodos distintos: vazante e cheia.

A área de estudo localiza-se na região próxima à confluência do Rio Tapajós e do Rio Amazonas, sendo formada por uma várzea composta por corpos d'água de diversos tipos de origem e composição. O sensor Hyperion/EO-1 coletou duas imagens sobre esta área: a primeira em 16 de setembro de 2001, no período de vazante das águas da planície para o rio Amazonas; e a segunda em 23 de junho de 2005, no final do período de cheia. Foi realizada uma campanha de campo para a coleta de dados espectrais e limnológicos, entre os dias 23 e 29 de junho de 2005, que proporcionaram informações úteis para relacionar os dados da segunda imagem Hyperion adquirida em 23 de junho de 2005 às condições reais do ambiente aquático estudado.

De forma específica, o trabalho teve os seguintes objetivos:

- 1) empregar um Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) sobre as imagens Hyperion para caracterizar as águas espectralmente distintas e mapear sua

distribuição em termos de abundância fracional sub-pixel, verificando as alterações relativas na composição da água nos dois períodos de observação (vazante e cheia);

- 2) verificar a similaridade entre os espectros obtidos em campo com o espectrômetro SPECTRON SE-590 e os extraídos de pixels da imagem Hyperion do período de cheia (23/06/2005), analisando a correlação destes dados e de outros parâmetros espectrais (análise derivativa) com os COAs;
- 3) utilizar as relações empíricas, obtidas no item anterior, para estimar a distribuição espacial dos COAs no período de cheia.

Um sensor imageador orbital possibilita revisitas temporais e a característica hiperespectral tem como vantagem a capacidade de adquirir instantaneamente milhares de espectros, compondo imagens que permitem uma visão sinóptica da área de estudo, com um nível de resolução espectral próximo daquele verificado em espectrorradiômetros de campo ou laboratório. O trabalho procurou demonstrar o potencial do uso destas imagens hiperespectrais para caracterizar as mudanças sazonais que ocorrem nos diversos sistemas aquáticos espalhados em um trecho da planície de inundação na Amazônica central, situado próximo a Santarém.

1.1 Organização do Documento

No presente capítulo (Capítulo 1) procurou-se contextualizar para o leitor o foco principal deste estudo e descrever o objetivo deste estudo. Este documento possui mais quatro capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre a dinâmica da água em planícies de inundação Amazônica, e segue também apresentando as técnicas de sensoriamento remoto do estado da arte que possibilitam a extração de informações de constituintes em águas opticamente complexas. O Capítulo 3 descreve o conjunto de dados coletados sobre a área de estudo e a sequência metodológica adotada para analisar as imagens Hyperion. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nas abordagens descritas no capítulo anterior. O capítulo 5 é o último, em que são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ambiente Aquático da Planície de Inundação Amazônica

Os ecossistemas de planícies de inundação são caracterizados pela flutuação anual do nível da água e oscilam entre fase terrestre e aquática. A Amazônia apresenta planícies de inundações formadas por sistemas de rios volumosos acompanhados por planícies extensas pobremente drenadas, que favorecem a formação de lagos perenes e/ou intermitentes.

O funcionamento ecológico da planície de inundação na Amazônia central foi relatado em Junk (1997), após uma vasta revisão de pesquisas científicas. O autor e cientistas colaboradores identificaram que a dinâmica dos nutrientes é o principal fator responsável pela grande produtividade de biomassa observada na Zona de Transição Aquática-Terrestre (ZTAT) e está intimamente ligada às propriedades hidroquímicas da água dos lagos da várzea. Os principais aspectos que, segundo Junk (1997), devem ser considerados para descrever as variações espaciais e temporais que ocorrem na qualidade da água deste sistema “pulsante” foram sumarizados a seguir.

2.1.1 Histórico Geológico

As planícies de inundação dos grandes rios Amazônicos são de origens recentes e são resultantes de mudanças climáticas globais. Durante os períodos glaciais o nível do oceano diminuiu mais que 100 m em relação aos períodos interglaciais. Por consequência desse efeito, as declividades dos rios Amazônicos aumentaram causando erosões de vales extensos, e assim, formando com sedimentos terciários a depressão da Amazônia central, situada entre os Andes a oeste, o escudo central Brasileiro ao sul e o escudo da Guiana ao norte. Durante os períodos interglaciais, o derretimento do gelo provocou a elevação do nível do oceano represando os rios em seus vales. Os rios foram ajustando a geometria hidráulica por deposição de sedimentos nos vales, até atingir um

novo equilíbrio. Este processo ocorreu três vezes durante os últimos 150.000 anos (Junk e Silva, 1995).

A maior parte dos sedimentos depositados durante os períodos interglaciais foi erodida nos períodos glaciais subseqüentes. Remanescentes de terraços de sedimentos do último período interglacial podem ser encontrados atualmente, e são referidos como “Várzea Pleistocênica”. A maior parte dos sedimentos da planície de inundação do rio Amazonas e seus grandes tributários são de apenas alguns mil anos de idade e, portanto, pouco consolidados (Junk, 1997; Junk e Silva, 1995).

2.1.2 Clima e Hidrologia

A precipitação total na Amazônia central é de 2000-3000 mm e em somente três meses do ano a evaporação ultrapassa a precipitação. A temperatura média mensal é de 25,9° C em Fevereiro e 27,6° C em Setembro. O ingresso repentino de massas de ar polar durante o inverno pode resultar em uma queda na temperatura para em torno de 17° C em Manaus. Este fenômeno é conhecido como “friagem” (Junk e Silva, 1995).

As planícies de inundação de rios Amazônicos são sujeitas a um pulso de inundação monomodal previsível, resultante do degelo anual de verão na Cordilheira dos Andes somado ao escoamento superficial de precipitações sobre a bacia hidrográfica (Junk, 1997). Uma análise de valores de cotas mensais da hidrógrafa do rio Amazonas entre período de 1993 a 2003 (Figura 2.1), registrada na cidade de Óbidos-PA situada 700 km à montante da foz no oceano Atlântico, demonstra que o nível sazonal da água na Amazônia central variou com uma amplitude média em torno de 6 m. Os níveis máximos são atingidos entre maio e julho e mínimos entre novembro e dezembro.

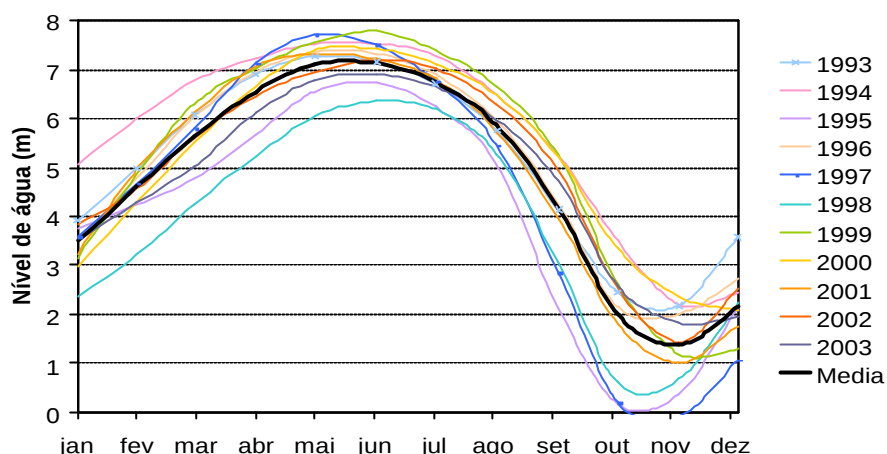


Figura 2.1 - Hidrógrafa registrada em Óbidos.
 FONTE: Agência Nacional de Águas (ANA).

2.1.3 Condições Hidroquímicas

As águas dos rios amazônicos são classificadas em três tipos principais, com base na aparência óptica: *água clara*, *água preta* e *água branca*. Segundo Junk e Silva (1995) essa classificação é útil sob aspectos ecológicos, mas as medidas de parâmetros limnológicos apresentam gradientes, indicando que a distinção entre águas de composições diferentes não seja de forma tão simples e direta. As características hidroquímicas das águas que percorrem a bacia Amazônica variam amplamente, em função da origem da água, do tipo de solo que drenam e das condições climáticas.

Rios de água branca originam-se no ambiente montanhoso de forte intemperismo físico dos Andes. Os sedimentos contêm montmorilonita e illita e possuem uma grande capacidade de troca de íons. As águas brancas Amazônicas são caracterizadas como “águas carbonáceas”, indicando águas doces não somente ricas em carbonatos, mas também ricas em cálcio que é o cátion dominante. Próximo à Manaus o rio Amazonas apresenta transparência de 40 cm, concentração de sedimentos em suspensão em torno de 100 mg l^{-1} e condutividade elétrica em torno de $60 \mu\text{S cm}^{-1}$. Durante o curso dos Andes até o oceano o conteúdo de sólidos dissolvidos no rio Amazonas decai significativamente pela mistura com as massas de água dos seus tributários, que geralmente são mais pobres em sólidos dissolvidos. No entanto, a composição iônica, i.e., as proporções dos principais cátions e ânions, não se alteram significativamente ao

longo de seu curso. Os solos da planície de inundação são considerados férteis (Junk, 1997).

Rios de água preta drenam, em geral, bacias hidrográficas com solos podzólicos. As suas águas são pobres em minerais dissolvidos e sedimentos em suspensão, mas ricas em ácidos húmicos e fúlvicos resultantes da decomposição incompleta do húmus do solo. Estes componentes da matéria orgânica dissolvida na água provocam a coloração escura. O rio Negro próximo a Manaus apresenta transparência de 1,5-2 m, condutividade elétrica em torno de $10-15 \mu\text{S cm}^{-1}$ e pH próximo a 4,5. A quantidade de cátions de metais alcalinos terrosos é bastante baixa. Os principais ânions são cloreto e sulfato. Os solos são considerados inférteis (Junk e Silva, 1995).

Os grandes rios de água clara Xingu e Tapajós têm suas cabeceiras nos escudos cristalinos pré-cambrianos das Guianas e da região central do Brasil. Estes rios drenam solos muito intemperizados. Suas águas são transparentes e apresentam baixas concentrações de sedimentos inorgânicos em suspensão e de material orgânico e inorgânico dissolvidos. A transparência varia entre 2-3 m. Essas águas são variáveis em termos de composição química e fertilidade, mas assumem uma posição intermediária entre água preta e água branca (Junk e Silva, 1995).

As condições hidroquímicas nos lagos da planície de inundação (várzea) são fortemente influenciadas pela contribuição de águas com diferentes concentrações de sólidos dissolvidos e sedimentos em suspensão do rio principal, afluentes da terra firme, precipitação, e lençol freático. Devido à grande flutuação do nível de água do rio principal, o pulso de inundação controla o impacto das outras contribuições de água (Figura 2.2). A influência de afluentes laterais aumenta ao se distanciar do rio principal e se aproximar da borda de terra firme. O impacto de águas de chuva é comparativamente pequeno. Os lagos da várzea adjacentes ao rio Amazonas possuem águas carbonáceas, identificadas pela composição iônica típica de água branca, que se preservam com pouca variação em relação ao rio principal. Esta afirmativa é válida, segundo Junk (1997), até mesmo quando as águas dos lagos se tornam diluídas por contribuições locais de águas da terra firme pobres em eletrólitos. Em lagos isolados no

período de água baixa, as concentrações dos íons podem se elevar a até 10 vezes maior que a concentração do rio principal (Junk, 1997).

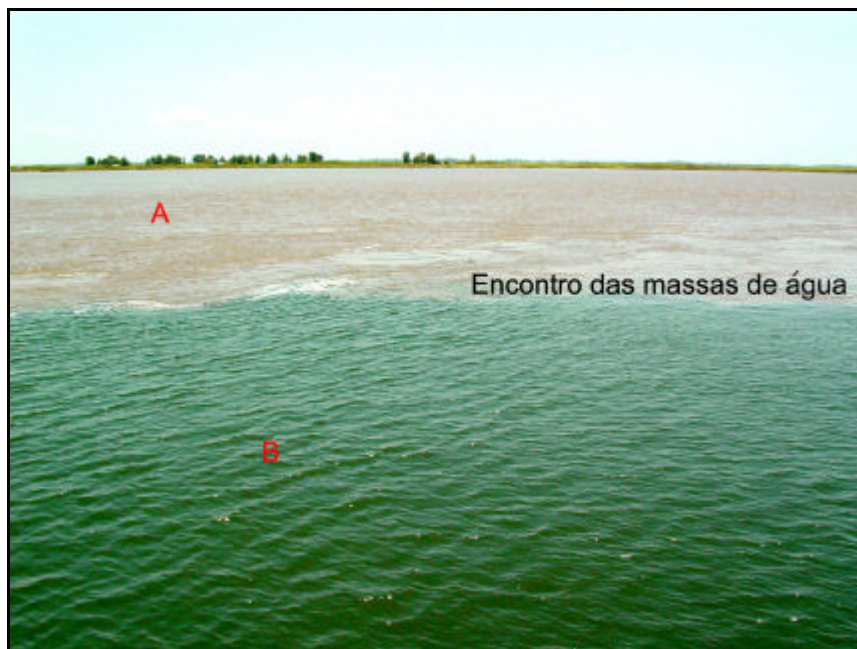


Figura 2.2 - Água do rio Amazonas (A) se misturando com águas da planície de inundação (B) dentro da várzea do Lago Grande de Curuai.

Processos biogênicos também influenciam as propriedades químicas da água dentro da planície. O crescimento abundante de plantas herbáceas aquáticas e terrestres em planícies de inundação de água branca resulta em uma grande retirada, armazenagem e liberação de bioelementos, que controlam a dinâmica de nutrientes na planície de inundação (Junk, 1997).

2.1.4 Processos de Sedimentação e Erosão

Os grandes rios amazônicos exercem uma forte influência mecânica na planície de inundação devido a sua grande vazão, grande amplitude de inundação e, no caso de rios de água branca, devido à sua grande carga de sedimentos transportados. Uma sutileza bem menos perceptível que a formação dos bancos de sedimentos, porém muito importante em termos ecológicos, é a distribuição anual de uma camada de sedimento de 1-3 mm sobre uma grande parte da planície de inundação durante a cheia. Segundo

Junk e Silva (1995) estes sedimentos representam uma fonte importante de nutrientes para o sistema.

Durante cheias intensas, toda a planície de inundação é usada pelos grandes rios Amazônicos para o transporte da água. Anualmente, o rio Amazonas transporta $1,1-1,3 \times 10^9$ t de sedimentos para o Oceano Atlântico. Parte dos sedimentos é periodicamente depositada pelo rio Amazonas em seu canal durante a cheia e re-suspendida e transportada novamente no sentido de jusante durante o período de água baixa (Junk e Silva, 1995).

2.1.5 Produção Primária

Em sistemas de planície de inundação a produção primária depende da composição da água e da fertilidade dos sedimentos durante a fase aquática, e da umidade do solo durante a fase terrestre (Junk, 1997). As principais comunidades produtoras são: a floresta da planície de inundação; plantas herbáceas aquáticas e terrestres; fitoplâncton; e perifiton.

A produção de fitoplâncton alcança em torno de 6t de material orgânico $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. A disponibilidade de nitrogênio e fósforo varia entre os tipos de água e entre as estações do ano e pode se tornar um fator limitante para a produção de fitoplâncton até mesmo em lagos de planície de inundação de água branca que é tipicamente rica em nutrientes. Experimentos comparativos de enriquecimento de nutrientes em um lago de igapó e um lago de várzea indicaram limitações de fósforos em águas pretas e limitações de nitrogênio em águas brancas. Em uma várzea de água branca do rio Solimões, outros experimentos realizados em diferentes estágios do pulso de inundação apontaram limitações para o crescimento de fitoplâncton por haver pouco fósforo durante a enchente e cheia e pouco nitrogênio durante a vazante e seca (Junk, 1997).

Águas de afluentes de terra firme e da chuva são relativamente ricas em nitrogênio e, portanto, podem ser fontes importantes de nitrogênio para os lagos da planície. Esta contribuição pode influenciar fortemente a cadeia trófica, pois o nitrogênio é

considerado um fator limitante para o crescimento de fitoplâncton nos lagos de várzea (Junk, 1997).

A exportação de nutrientes pela água que sai da planície de inundação durante a vazante é contra-balanceada pelo seqüestro realizado pelas macrófitas. A decomposição das macrófitas durante a fase terrestre ajuda a preencher o reservatório de nutrientes no sedimento (Junk, 1997). A Figura 2.3 mostra um habitat da planície de inundação do rio Amazonas com elevada produção primária.



Figura 2.3 - Habitat com elevada produção de biomassa na planície de inundação do rio Amazonas, situado próximo à cidade de Alenquer (foto registrada 28-06-2005).

2.1.6 Dinâmica de Circulação Hídrica

Durante o período de subida ou descida do nível do rio Amazonas o volume que inunda a várzea e a velocidade de escoamento se alteram. Isto provoca alterações, também, nas taxas de sedimentação de partículas e na distribuição vertical de nutrientes. O regime de luz nos corpos d'água está relacionado ao conteúdo de matéria orgânica dissolvida e de sedimentos orgânicos e inorgânicos em suspensão (Kirk, 1983).

As imagens do sensor ETM+/Landsat7 exibidas na Figura 2.4 permitem observar visualmente as variações na composição da água, que foram induzidas pelo pulso de inundação entre os anos 2001 e 2002, sobre a região da planície de inundação situada próxima à confluência dos rios Amazonas e Tapajós. Ao longo do período de vazante, quando os níveis de água nos lagos diminuem para profundidades menores que 4 m, o sedimento depositado no fundo é ressuspensão pela turbulência induzida, principalmente, pelo vento. Assim, a concentração de sedimentos em suspensão nas águas rasas dos lagos se eleva consideravelmente. Os sedimentos ressuspensos trazem consigo nutrientes que se tornam mais disponíveis na coluna de água, por isto, o período de vazante costuma ser o de maior produção de fitoplâncton (Figuras 2.4(a) e 2.4(d)). Durante o período de nível baixo do Amazonas os lagos ficam isolados do rio principal (Figura 2.4(b)) e os nutrientes disponíveis para as plantas na zona eufótica decaem rapidamente. A principal mudança sobre as condições hidroquímicas ocorre quando o rio invade os lagos no período de enchente. A imagem ETM+/Landsat7 apresentada na Figura 2.4(c) mostra o final do período de enchente, no ano 2002, quando o nível de água do Rio Amazonas subiu e extravasou para dentro dos lagos da planície. O aumento do volume dos lagos causa uma diminuição da velocidade de escoamento no interior da planície, permitindo que os sedimentos em suspensão trazidos pelo rio se decantem. Durante a cheia a concentração de sedimentos em suspensão nos lagos da planície é menor em relação à água do rio Amazonas.

Segundo Junk (1997), uma mudança na amplitude da inundação pode modificar a disponibilidade de nutrientes dos lagos em função da mudança causada na ZTAT. O nível de água referente à imagem de 9 de setembro de 2002 (Figura 2.4(a)) se apresentou 1 m abaixo em relação à imagem de 9 de setembro de 2001 (Figura 2.4(d)). Comparando estas duas imagens é possível perceber que realmente houve variações significativas na composição da água, observando-se na imagem de 2001 florações de fitoplâncton com maior intensidade e forte domínio nos lagos do norte desta cena, indicadas pelas setas verdes na Figura 2.4(a).

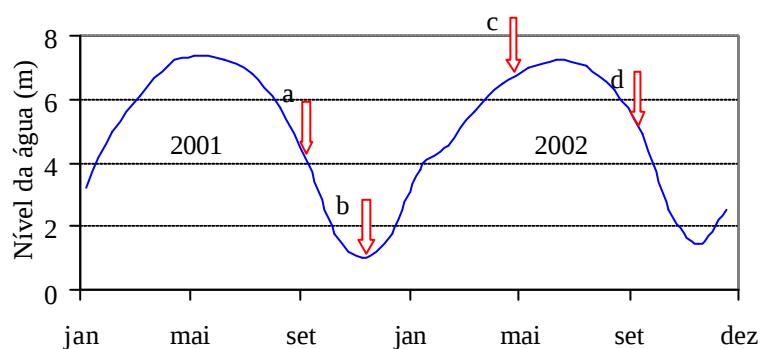
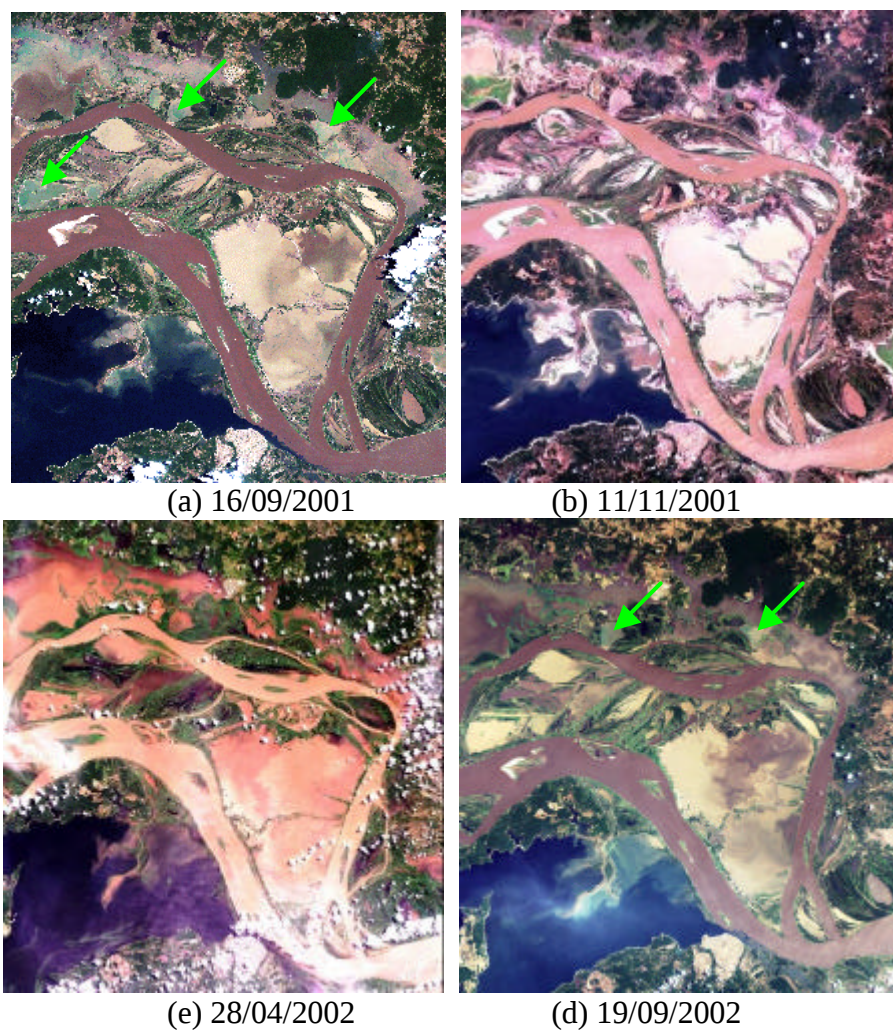


Figura 2.4 - Composições coloridas normais (RGB-321) do sensor ETM⁺/Landsat7, adquiridas sobre a região central da planície de inundação do rio Amazonas, entre 2001 e 2002. O conjunto de imagens demonstra as variações sazonais sobre a composição da água. As setas verdes apontam para fluorescências de fitoplâncton. Curvas hidrógrafas, indicando a data de aquisição de cada cena ao longo do pulso de inundação, são mostradas na porção inferior da figura.

2.2 Propriedades Ópticas de Águas Naturais

Em estudos de sensoriamento remoto (SR) óptico, de uma forma geral, é necessário conhecer as origens dos fluxos de radiação que atingem o sensor. Quando sistemas aquáticos são estudados - em comparação, por exemplo, a sistemas terrestres -, a diferenciação das componentes radiativas é ainda mais importante, pois a energia proveniente dos sistemas aquáticos é relativamente baixa. A radiação que atinge o sensor possui componentes originárias do espalhamento pela atmosfera, das reflexões especulares da radiação solar direta e difusa, e do fluxo de radiação emergente da água. Este último é o que traz informações sobre as substâncias em suspensão na coluna d'água, sendo, portanto, o único de interesse. A influência dos demais fluxos pode ser maior ou menor, dependendo das condições físicas no momento da detecção da radiação (L) pelo sensor (por exemplo, elevação solar e atmosfera). A Figura 2.5 ilustra os diferentes fluxos de radiação, os quais são descritos a seguir.

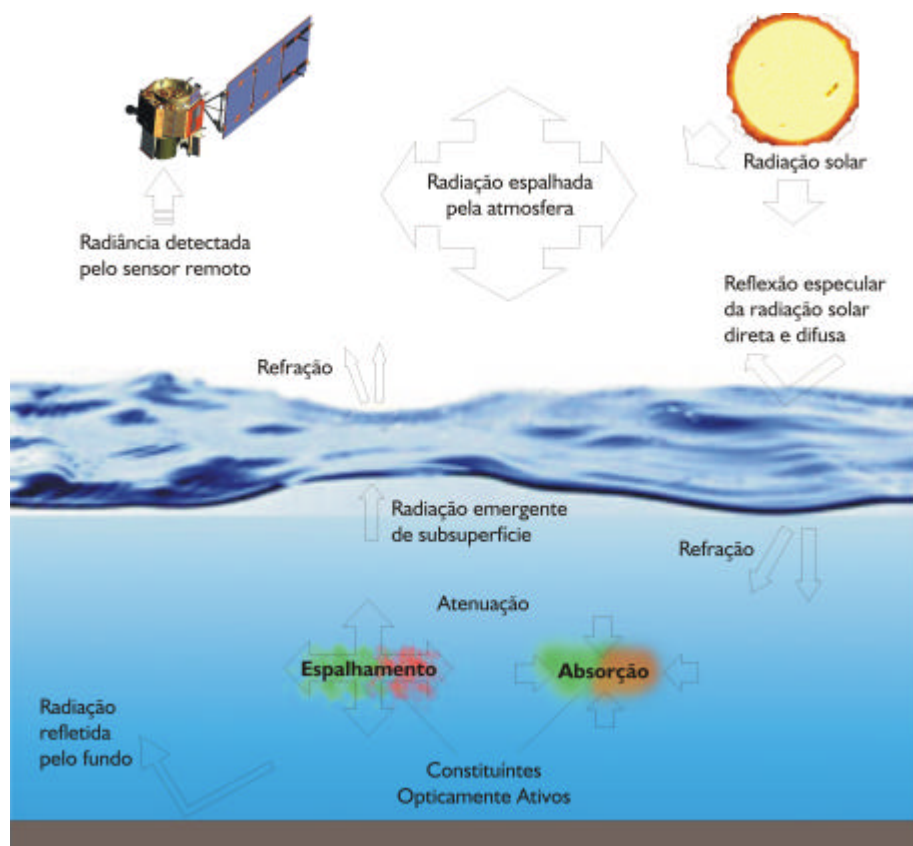


Figura 2.5 - Fluxos de radiação detectados por sensores remotos sobre sistemas aquáticos.

Reflexão especular da radiação solar direta: irradiância direta do sol e difusa espalhada pelas nuvens e gases da atmosfera incide sobre os corpos d'água. A irradiância solar direta representa a parcela do fluxo de radiação que se propaga através da atmosfera e incide na superfície, sem ter sofrido interferência pelo efeito de espalhamento da atmosfera ou reflexão por nuvens. A superfície da água apresenta propriedades especulares – relacionadas à diferença de densidade óptica entre a água e o ar – que provocam a reflexão do fluxo radiante incidente, de tal maneira que uma parcela deste fluxo não consegue penetrar além do primeiro milímetro da coluna d'água. A energia proveniente desta componente que atinge o sensor não possui, portanto, informação sobre a coluna d'água. Dependendo do posicionamento entre o observador, a superfície da água e a inclinação do sol – a geometria de aquisição – o efeito da reflexão especular pode dominar os demais fluxos de radiação e prejudicar a verificação das características ópticas do sistema aquático. Segundo (Kirk, 1994), em um corpo d'água cuja superfície encontra-se bem lisa (sem qualquer ondulação), a proporção de fluxo radiante refletido que retorna para a atmosfera aumenta de 2%, quando o feixe de luz incide verticalmente, até praticamente 100% quando a inclinação solar ultrapassa (aproximadamente) os 45%.

Reflexão especular da radiação solar difusa: a parcela da irradiância solar que chega à superfície em diversos ângulos de incidência, após ter sido refletida pelas nuvens ou sofrido espalhamento pela atmosfera, é denominada de irradiância solar difusa. De forma análoga à componente de irradiância solar direta, uma parcela do fluxo radiante difuso que incide na superfície do corpo d'água é refletida pela camada da superfície, enquanto que outra parte deste fluxo penetra através da interface ar-água, atingindo a sub-superfície. A irradiação difusa incide sobre a superfície a partir de todo o hemisfério. Devido a esta complexa distribuição angular, a proporção de luz que é refletida pela superfície é difícil de ser determinada. A fração da radiação que será refletida em relação a que deverá penetrar na sub-superfície depende do ângulo de incidência dos feixes de radiação, sendo que quanto maior for o ângulo em relação ao zênite, maior será a chance da radiação ser refletida especularmente. Assumindo que a

radiância mantém-se a mesma para todas as direções, (Kirk, 1994) estimou uma reflectância de 6,6% por esta componente, para uma superfície lisa.

Radiação espalhada pela atmosfera: cerca de 80-90% do fluxo de radiação recebida pelos sensores a bordo de satélites direcionados aos corpos d'água é decorrente ao efeito de espalhamento atmosférico de Rayleigh, gerado por moléculas do ar e por aerossóis (Kirk, 1994). Além disto, a presença da atmosfera interfere seletivamente na radiação que atinge a superfície da água, – influenciando, assim, a qualidade da radiação que interage com os componentes da água.

Radiação emergente de sub-superfície: esta é a componente resultante da interação da irradiância solar descendente transmitida para a sub-superfície com a água e seus Constituintes Opticamente Ativos (sedimentos em suspensão, fitoplâncton, dentre outros), cuja natureza é modificada em decorrência desta interação. As interações que ocorrem no campo de luz submerso são relacionadas às propriedades ópticas inerentes do corpo d'água. Quando o fluxo radiante atravessa o meio aquático, o mesmo perde intensidade à medida que a profundidade aumenta como consequência dos efeitos de absorção e espalhamento (Kirk, 1994; Novo et al., 1995). A quantidade de radiação refletida pela sub-superfície da água pode ser estimada pela razão entre o coeficiente de espalhamento b e o coeficiente de absorção a . No entanto, a diferença de densidade óptica entre a água e o ar faz com que parte deste fluxo de radiação seja refletida de volta para baixo, enquanto a parte que atravessa a superfície da água é refratada (segundo a lei de Snell), causando seu espalhamento – aumentando, portanto o ângulo sólido – e sua consequente perda de intensidade.

Radiação refletida pelo fundo: a influência da reflectância do fundo será mais pronunciada em águas rasas e claras e ocorrerá conforme as propriedades espectrais do material do fundo. Na Amazônia, por exemplo, os lagos são rasos e eventualmente o fundo pode ser um componente importante do sinal em casos de águas claras.

Segundo Jensen (2000), para acessar informação sobre as propriedades ópticas inerentes, a partir de dados radiométricos coletados por sensores remotos, é necessário isolar a radiação emergente de sub-superfície dos demais fluxos contribuintes sobre a

radiância medida. Porém, em geral, nos diversos casos de estudos sobre a composição da água por SR, é difícil adotar métodos dedutivos para extrair esta informação, pois alguns parâmetros importantes (p.ex., atenuação atmosférica e reflectividade da superfície da água) não são passíveis de quantificação pixel a pixel.

2.2.1 Constituintes Opticamente Ativos

Como pode ser observado na Figura 2.6, o coeficiente de absorção (*a*) da água pura é mínimo na região compreendida entre 400 e 600 nm, aumentando rapidamente na região do infravermelho. Contrariamente, o coeficiente de espalhamento (*b*) é máximo na região do azul e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho. Neste caso, pode-se concluir que a radiação refletida pelas moléculas da água pura é máxima na região do azul e decresce em direção ao vermelho (Figura 2.6). Em águas naturais, os Constituintes Opticamente Ativos (COAs) presentes na sub-superfície passam a ser determinantes sobre as propriedades ópticas inerentes de corpos d'água. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes e substâncias húmicas são os principais COAs responsáveis pela variação espectral da água. As propriedades de absorção e espalhamento dos COAs irão definir seletivamente (Figura 2.6) a forma final da curva de reflectância. Em geral, a variação nas concentrações dos COAs regulará a intensidade de radiação refletida na sub-superfície e a magnitude das feições espectrais produzidas (Kirk, 1994).

Freqüentemente as águas continentais apresentam a combinação de diversos COAs na coluna d'água. No entanto, em alguns casos ocorre a influência dominante de apenas um determinado COA, o que ajuda a identificar e compreender de que forma as feições existentes nos espectros de reflectância podem estar relacionadas a determinadas substâncias. A seguir será brevemente discutido como os três principais COAs tratados na literatura influenciam a variação da resposta espectral de corpos d'águas, tanto sobre o aspecto qualitativo como quantitativo.

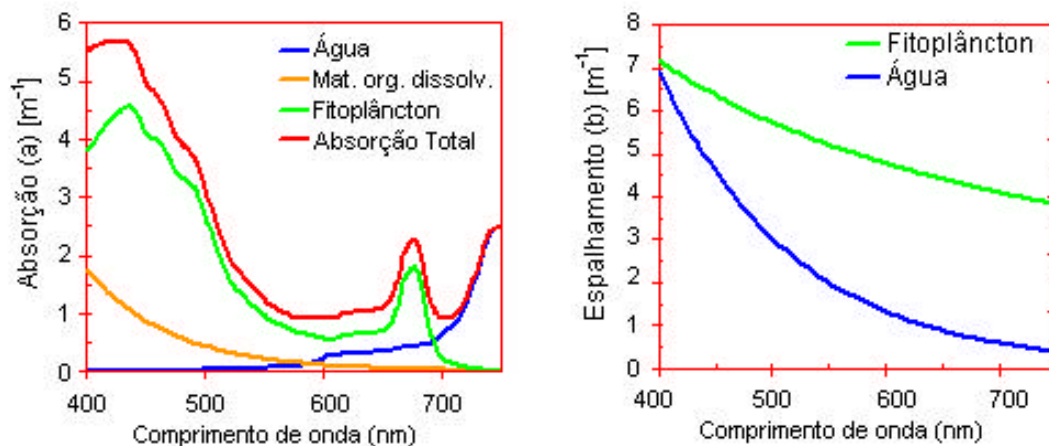


Figura 2.6 - Variação do coeficiente a da água pura, de Constituintes Opticamente Ativos e a absorção total resultante; Variação do coeficiente b para água pura e fitoplâncton.
 FONTE: Adaptado de Malthus (2003)

2.2.1.1 Matéria Orgânica Dissolvida

As substâncias húmicas, freqüentemente, apresentam coloração amarelada e influenciam fortemente a absorção de luz na coluna d'água. Enquanto a água pura apresenta espalhamento mais intenso na faixa do azul, a presença de matéria orgânica dissolvida provoca absorção seletiva de radiação em comprimentos de onda menores, dentro da faixa do VIS. Este fato é notado em termos visuais, pois corpos d'água com elevada concentração de matéria orgânica dissolvida apresentam coloração mais escura e amarelada (Jensen, 2000).

2.2.1.2 Fitoplâncton

Nas algas existem inúmeros pigmentos fotossintetizantes, e o grande interesse de estudos SR é usar o conhecimento das bandas de absorção específicas para poder ter acesso aos prováveis tipos de comunidades fitoplanctônicas (p.ex., Méléder et al., 2003). A clorofila a (Cl- a), por exemplo, é um fitopigmento presente em todos os grupos de algas de águas continentais e a estimativa de sua concentração é freqüentemente adotada como indicadora de bio-produção dos sistemas aquáticos.

De modo geral, os pigmentos que atuam na fotossíntese provocam a diminuição da reflectância na faixa do azul (400-515 nm) e o aumento na faixa do verde (515-600 nm). O aumento de reflectância no verde é atribuído ao fato de ocorrer um processo de espalhamento interno nas células do fitoplâncton. De fato, essas algas são partículas refratoras, portanto, provocam o aumentam do espalhamento também em comprimentos de onda do IVP (700-900 nm). Os métodos de SR em estudos de fitoplâncton fazem uso do conhecimento de que as células fotossintetizadoras absorvem luz de forma mais intensa em certas regiões definidas do espectro (Tabela 2.1). Thiemann e Kaufmann (2000) propuseram procedimentos para determinar o conteúdo de $Chl-a$, utilizando espectros de radiometria em lagos de diferentes estados tróficos. Os autores se basearam em bandas de absorção distintas na faixa do azul (comprimentos de onda próximos a 440 nm) e na faixa do vermelho (próximos a 678 nm).

Tabela 2.1 - Comprimento de onda de absorção dos pigmentos.

Absorção (nm)	Pigmento	Tipo de Plâncton	Absorção (nm)	Pigmento	Tipo de Plâncton
438	clorofila -a	todos os tipos	615	c-ficocianina	cianobactéria
470	hexa - fcoxantina	cianobactéria	624	Cp -cianina	cianobactérias
480	β caroteno	dinoflagelados, diatomáceas, crisófitas	627	ficorobilina	cianobactéria
493	ficorobilina	cianobactérias	650	aloficocianina	cianobactéria
493(in vivo)	ficoeritrina	cianobactéria	673 (in vitro)	clorofila -a	
562	c-ficoeritrina	cianobactérias	676	clorofila -a	
567	ficorobilina	cianobactérias	680 (in vivo)	clorofila -a	cianobactéria e eucariotes

FONTE: Dekker (1993); Weaver e Wrigley (1994).

A presença de fitoplâncton é capaz de produzir, através de seus pigmentos fotossintetizadores, efeitos de absorção ao longo do espectro na região do VIS e ao mesmo tempo contribuir para o aumento do espalhamento juntamente com as demais

partículas refratoras em suspensão. O aumento de biomassa do fitoplâncton pode ser relacionado, empiricamente, ao aumento de reflectância provocado na região do IVP (Kirk, 1994).

As células do fitoplâncton também emitem certa quantidade de luz, próxima a 1% do que foi absorvida pela célula na fotossíntese, sendo esta luz re-emitida na forma de fluorescência. O efeito de fluorescência devido à *Chl-a* pode ser notado em espectros de reflectância por determinar um pico em torno de 685 nm. Os espectros de reflectância de águas dominadas por fitoplâncton também exibem um outro pico de reflectância em torno de 705 nm, que é causado por fluorescência de clorofila induzida pelo Sol (Gitelson et al., 2000).

2.2.1.3 Sedimentos em Suspensão

Sedimentos em suspensão são constituintes que ocasionam, principalmente, o efeito de espalhamento da radiação na sub-superfície dos corpos d'água. Inúmeros pesquisadores reportaram a forte correlação positiva que existe entre a concentração de partículas de sedimentos em suspensão e a radiância espectral (L_p) (Chen et al., 1992; Curran e Novo, 1988; Novo et al., 1991; Novo et al., 1989a, 1989b; Ritchie et al., 1990; Ritchie et al., 1987). Esta relação tem sido aplicada aos dados de SR para estimar a distribuição espacial de concentração de sedimentos em suspensão sobre águas costeiras e continentais, como reservatórios, lagos e grandes rios. Este tipo de informação oferece subsídios ao gerenciamento da qualidade da água, o monitoramento da poluição e a modelagem da taxa de transporte de sedimentos.

2.3 Sensoriamento Remoto Hiperespectral

Estudos que objetivaram mapear a qualidade de águas opticamente complexas normalmente foram realizados com dados multiespectrais (Novo et al., 1995). No entanto, as imagens multiespectrais não são capazes de mostrar feições espectrais importantes aos estudos da composição da água. De fato, em um período de pouco mais de uma década, as vantagens de aplicações de sensores hiperespectrais têm sido demonstradas por proporcionarem imagens com maior continuidade espectral,

facilitando o uso de abordagens mais específicas que permitam quantificar os COAs em águas costeiras e continentais (p.ex., Brando e Dekker, 2003; Dekker, 1993; Galvão et al., 2003; Goodin et al., 1993).

Os sensores imageadores hiperespectrais fornecem, em cada pixel, medidas radiométricas com bandas estreitas e contínuas. A resolução espectral é próxima às condições de laboratório e isto proporciona diversas possibilidades para interpretação e análise de dados (Aspinall et al., 2002). As análises de imagens hiperespectrais são freqüentemente feitas pelo grau de ajuste empírico entre espectros da imagem e os de uma biblioteca de espectros de substâncias conhecidas que servem de referência para estimar a composição de pixels e fornecer uma medida indireta das substâncias analisadas. Esses espectros de referência podem ser medidos em laboratório ou em campo, mas também podem ser extraídos das próprias imagens hiperespectrais (Aspinall et al., 2002). Para estimar uma determinada substância é importante que o intervalo de faixa espectral cubra suficientemente as feições espectrais diagnósticas. O intervalo de comprimento de onda de 0,4 a 1,0 μm representa a faixa espectral de interesse para estudos de SR óptico da água, sendo esta faixa algumas vezes referida pela literatura como visível-infravermelho-próximo (*visible-near-infrared* - VNIR).

O Hyperion é o primeiro sensor orbital que produz imagens hiperespectrais da superfície terrestre, sendo transportado a bordo do satélite *Earth Observing One* (EO-1) em uma órbita de 705 km de altitude. O satélite EO-1, lançado em 21 de novembro de 2000, está inserido no programa “*New Millennium Program*” conduzido pela instituição *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Esta plataforma orbital foi projetada para avaliar o desempenho de novas tecnologias e de estratégias que visam melhorar a observação da Terra para uma variedade de aplicações.

Cada imagem adquirida pelo sensor Hyperion/EO-1 apresenta 242 bandas espectrais distribuídas na faixa de 356 nm a 2577 nm, com largura espectral de aproximadamente 10 nm e resolução espacial de 30 m. Destas bandas, apenas 196 são radiometricamente calibradas. O sistema possui um imageador espectrorradiométrico para o VNIR e um imageador espectrorradiométrico para o SWIR. A Tabela 2.2 abaixo resume as

características das imagens adquiridas pelo Hyperion. O Hyperion opera por varredura eletro-óptica (*pushbroom*) em um campo de visada de 7,5 km de largura perpendicular a órbita do satélite.

Tabela 2.2 - Especificações do conjunto de dados da imagem Hyperion.

Comprimento de onda	356-2577 (nm)
Número de bandas	242
Largura de bandas espectrais	0,01 μm
Tamanho de pixel	30 (m)
Dimensão da imagem	256 $\times$ 6460
Bandas VNIR	1 - 70 (356-1058 nm)
Bandas SWIR	71-242 (852-2577 nm)
Tipo de dados	2 <i>Signed Integers</i>
Ordem de pixels	BIL
Ordem de <i>byte</i>	<i>Network (IEEE)</i>
Tamanho de arquivo	800.427.520 (bytes)

FONTE: *Earth Resources Observation & Science (EROS) Data Center*.

O Hyperion, ao longo de sua operação em órbita, pode ser afetado por fatores que interferem na calibração radiométrica e espectral, gerando, assim, imagens que precisam ser corrigidas com cuidado antes de serem submetidas às aplicações que investigam os materiais da superfície (p.ex., Goodenough et al., 2003). Os dados brutos (nível 0) registrados são pré-processadas para o nível 1A e dispostos em arquivos de dados de medidas de radiância radiometricamente corrigida na unidade $\text{watts}/(\text{sr} \times \text{mícron} \times \text{m}^2) \times 40$ para as bandas do VNIR e $\text{watts}/(\text{sr} \times \text{mícron} \times \text{m}^2) \times 80$ para as bandas do SWIR. Após o primeiro ano em órbita, testes de validação foram conduzidos por cientistas (*science validation team*) e possibilitaram incorporações de outras correções radiométricas para distribuição dos dados Hyperion em nível 1B.

2.4 Correção Atmosférica

Uma das etapas mais críticas em análise de imagens hiperespectrais orbitais é a conversão dos dados para reflectância de superfície. Principalmente, quando é necessário que os espectros individuais da imagem sejam comparados diretamente a dados de laboratório ou de campo. Medidas de SR realizadas sobre a superfície terrestre são fortemente influenciadas pela atmosfera. Ambos, espalhamento e absorção por

gases e partículas, afetam a quantidade de radiação que chega ao sensor. A absorção por gases atmosféricos é dominada por vapor d'água e por menores contribuições de dióxido de carbono, ozônio e outros gases (Gao e Goetz, 1990). As bandas de forte absorção pela água fazem com que a atmosfera se torne opaca em alguns intervalos espectrais (por exemplo, intervalos em torno de 1,4 e 1,9 μm). *Atmospheric CORrection Now* – ACORN é um modelo de transferência radiativa que permite corrigir os efeitos atmosféricos sobre dados de imagens hiperespectrais, obtidas por sensores a bordo de plataformas aerotransportadas ou orbitais. O ACORN é um modelo atmosférico implementado em programa computacional disponível comercialmente que usa a tecnologia MODTRAN4. O modelo ACORN requer a entrada de parâmetros como a data e o horário de aquisição, a latitude e longitude da cena, e a elevação média, juntamente com outros parâmetros de modelagem atmosférica (Kruse, 2003). A estimativa de vapor d'água é feita pixel-a-pixel usando as feições de absorção posicionadas em 0,94 μm e 1,14 μm nos espectros de radiância dos pixels. O resultado do procedimento é a conversão de dados de radiância para valores de reflectância de superfície.

O modelo ACORN funciona bem para alvos terrestres. No entanto, os dados de SR coletados sobre ambientes aquáticos apresentam outros fatores que não são considerados por este modelo. Dentre as correções necessárias podem ser citados: efeitos de reflexão especular e espalhamento múltiplo pela interface ar/água e pela coluna d'água. Apesar das restrições e na falta de modelos mais refinados, alguns autores têm demonstrado o bom desempenho do modelo ACORN em estudos de ambientes aquáticos (p.ex., Kruse, 2003).

2.5 Métodos de Estimativa de Constituintes Opticamente Ativos

A radiância (L_λ) medida por espectrorradiômetros sobre a superfície da água em nível de laboratório, campo, aeronave ou satélite não são diretamente comparáveis sem que se considere as diferenças inerentes aos dados coletados em cada um destes níveis de aquisição (Tsai e Philpot, 1998). As medidas laboratório são normalmente realizadas sob condições controladas de geometria e intensidade e distribuição espectral de

iluminação. Muitas vezes, as amostras são também preparadas para facilitar a detecção da substância em estudo. Os procedimentos de laboratório freqüentemente adotam um padrão como referência, o qual pode ser, por exemplo, padrão de reflectância, absorção ou fluorescência, que possuem as propriedades bem definidas da substância alvo (Tsai e Philpot, 1998). Por sua vez, a L_r medida em campo é freqüentemente influenciada por fatores físicos originados das condições ambientais de iluminação (elevação solar e condições atmosféricas) e da superfície da água (superfície encrespada pelo vento ou pela presença de ondas). A L_r medida remotamente em nível aéreo e orbital também será afetada pela interferência dos gases da atmosfera.

Estes problemas são agravados pela baixa intensidade e pequena variação relativa de L_r que estão associados a uma grande variação relativa de COAs. Chen et al. (1992) relataram o fato de que a água raramente reflete mais do que 10% de sua radiação incidente. Segundo estes autores, mesmo em águas pouco turbidas, um aumento de 50 mg l⁻¹ na concentração de sedimentos em suspensão provavelmente não provoca um aumento na radiação refletida de mais que 1 %. A variabilidade de 1% na radiação refletida é menor que a variabilidade associada ao sensor, irradiância solar, superfície da água, ou atmosfera. Por exemplo, o erro de calibração absoluta do sensor Hyperion é de 8% (Green et al., 2003) e variações na iluminação no espaço e no tempo podem ser ainda maiores, reduzindo-se a valores mínimos de cerca de 3% somente em dias ensolarados e de elevada visibilidade (Chen et al., 1992). Nuvens, “carneirinhos” e reflexão especular geram outros problemas por provocarem áreas claras sobre o campo instantâneo de visada de terreno (*Ground Instantaneous Field of View* - GIFOV) do sensor (Chen et al., 1992). Finalmente, os modelos atmosféricos não são capazes de reproduzir a radiação refletida pela água de forma livre de incertezas.

As questões levantadas acima reduzem a informação da reflectância (R_r) relativa aos COAs presentes na sub-superfície da água e dificultam o estabelecimento de modelos gerais. Os modelos precisam ser desenvolvidos levando em conta as especificações do sensor remoto usado na aplicação e características observadas em cada ambiente aquático. Muitos métodos com aproximações empíricas têm sido propostos para relacionar dados de reflectância medidos por SR com as concentrações de COAs.

Atualmente os dois métodos mais usados são: “método de correlação” (análise de regressão) e o “método de modelo”. Ambos estes métodos exigem dados de campo, laboratório e/ou teóricos para calibração dos modelos.

O método mais popular é a correlação clássica, chamado método de Gordon, em que algoritmos para estimativa de clorofila (ou qualquer outra substância) operam a partir de técnicas de regressões estatísticas (p.ex., Gordon e Clark, 1981). Os algoritmos são freqüentemente auxiliados por índices extraídos de análises espectrais, p.ex., razão de bandas, análise derivativa, remoção do contínuo.

Uma outra forma de análise pode ser feita usando um modelo que simule as variações de misturas de COAs na água, a partir de espectros de reflectância padrões (Novo e Shimabukuro, 1994). Este método requer o conhecimento das propriedades ópticas dos constituintes, que em geral é adquirido por análises espectrais de experimentos *in situ* ou de laboratório. Segundo Arst (2003), existem ainda vários outros algoritmos e modelos que são usados paralelamente, não havendo concordância entre os autores no tocante ao melhor método a ser adotado. Portanto, é do interesse de cada autor encontrar o método que melhor se adapte aos seus objetivos e aos tipos de dados e condições em estudo.

2.6 Análise Derivativa

Sabe-se que determinadas feições que ocorrem em curvas espectrais são geralmente relacionadas à presença de COAs que favorecem a absorção e o espalhamento da radiação. Assim, além de observações diretas sobre as curvas de reflectância, pode-se fazer uso da técnica de análise derivativa para ajudar a evidenciar informações úteis para caracterizar os componentes de interesse.

Quando é possível assumir que os componentes que causam variações indesejáveis na radiância detectada por um sensor se comportam como constantes aditivas e espectralmente independentes ao longo do intervalo espectral de interesse, então, a subtração de L_2 entre duas bandas de comprimentos de onda espaçados pode reduzir os seus efeitos. Esta premissa é verificada para os fluxos de interações da radiação na

atmosfera e na água na faixa VNIR do espectro eletromagnético, e é adotada como base para grande parte dos índices de subtração entre bandas que são comumente usados em algoritmos bio-ópticos.

Chen et al. (1992) observaram que a derivada espectral apresenta maior eficiência em relação aos índices de subtração entre bandas. O embasamento matemático da derivada espectral está fundamentado nas mudanças na radiância (L_λ) ou reflectância (R_λ) espectral com o comprimento de onda (λ) a primeira ordem (DR_λ) ou a ordens maiores ($D^n R_\lambda$) (Philpot, 1991). Devido à sua natureza – graficamente representada pela inclinação das tangentes em cada ponto da curva –, a derivada evidencia os pontos onde há mudanças bruscas de resposta espectral.

Ao adotar-se o pressuposto de que cada componente do sinal pode ser representado por um polinômio de ordem n , a diferenciação sucessiva da função removeria gradativamente os efeitos de menor ordem. A primeira derivada, por exemplo, parece remover o sinal da reflectância da água, facilitando, assim, a identificação de sedimentos inorgânicos em suspensão na água. A segunda derivada, por sua vez, parece remover os efeitos da turbidez causada por sedimentos em suspensão, evidenciando a presença do fitoplâncton (Goodin et al., 1993). Derivadas de segunda ordem ou de ordens maiores são geralmente insensíveis à variação nas condições de intensidade de iluminação, sejam estas causadas por variações no ângulo solar, na cobertura de nuvens ou condições na superfície da água. Além disto, nos intervalos de amostragens espectrais usados em espectroscopia as derivadas são geralmente pouco sensíveis às variações que ocorrem na radiação solar direta e na difusa (Tsai e Philpot, 1998). Este fato é importante em estudos sujeitos às condições de iluminação tão variáveis como no ambiente aquático.

O uso de análise derivativa para estimar a concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão foi avaliado por Chen et al. (1992), que comparou medidas de laboratório e de campo. Mesmo sob condições de campo, três regiões do espectro em comprimentos de onda no entorno de 450-550 nm, 675-750 nm e 800-1000 nm sofreram grandes mudanças na derivada da reflectância com a concentração de sedimentos inorgânicos

em suspensão. Portanto, segundo Chen et al. (1992), estas são regiões espectrais candidatas a serem empregadas na estimativa de concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão.

Em águas complexas onde sedimentos em suspensão se misturam com fitoplâncton, em geral, se observa uma forte relação entre a reflectância e a turbidez, porém fraca relação entre a reflectância e a concentração de clorofila-*a*. Nestes casos, a reflectância dos sedimentos inorgânicos em suspensão é dominante sobre o comportamento espectral da água e, portanto, haverá sérias dificuldades em estimar a concentração de clorofila-*a* usando a reflectância de forma direta, mesmo em comprimentos de ondas específicos. Han e Rundquist (1997) testaram o uso da primeira derivada espectral para estimar clorofila em presença de sedimentos em suspensão. A primeira derivada em 690,7 nm (Figura 2.7) apresentou alta correlação com a clorofila-*a* e baixa correlação com a turbidez.

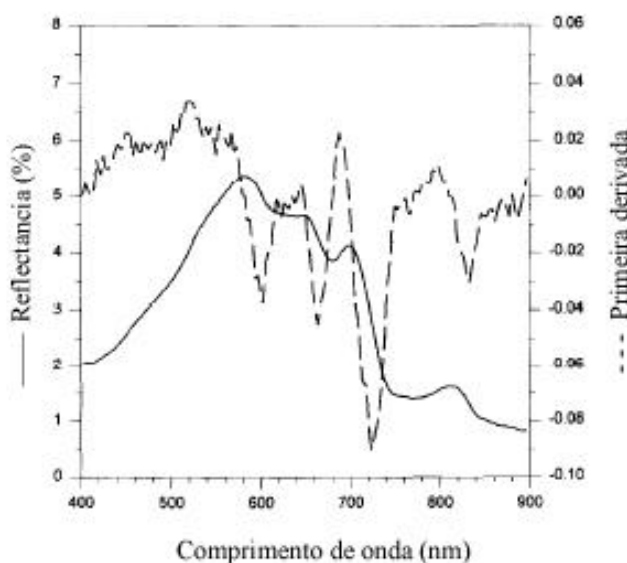


Figura 2.7 - Exemplo de reflectância e a primeira derivada espectral.
FONTE: Han e Rundquist (1997).

2.7 Modelo Linear de Mistura Espectral

As imagens hiperespectrais registradas por sensores aerotransportados e orbitais, geralmente, apresentam resolução espacial de algumas dezenas de metros de cobertura da superfície para cada pixel (p.ex., 30m para o Hyperion). Portanto, um aspecto a ser

levado em conta quando se deseja analisar uma imagem para extrair informações de um material ou uma substância de interesse é o efeito de mistura espectral, pois substâncias com diferentes propriedades espectrais estarão representadas em um pixel individual de uma imagem.

Diversos pesquisadores investigaram as escalas e linearidades com que ocorrem os efeitos espectrais de mistura na superfície. Singer e McCord (1979) observaram que quando a escala de ocorrência de mistura é grande (macroscópica), o processo é linear (Figura 2.8). Para misturas microscópicas de substâncias, entretanto, o efeito espectral é, em geral, não-linear (Nash e Conel, 1974; Singer, 1981).



Figura 2.8 - Exemplos conceituais de escalas de mistura em um pixel: puro (esquerda); de mistura microscópica (centro); e de mistura macroscópica (direita).

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) pressupõem que não existem interações entre as substâncias. Cada fóton interage com apenas uma substância, sendo os sinais resultantes aditivos (processo linear). O espalhamento múltiplo que envolve diferentes substâncias pode ser visto como multiplicações em cascata (processo não-linear). A escala espacial da mistura e a distribuição física das substâncias regem o grau de não-linearidade do processo.

Segundo Boardman e Kruse (1994), embora as substâncias geralmente se distribuam de forma heterogênea sobre a superfície terrestre, as técnicas de separação de componentes de mistura são aproximações lineares que aparentemente funcionam bem em diversas circunstâncias. Os modelos lineares não são tão exatos quando comparados aos não-lineares. No entanto, para os efeitos de primeira ordem, eles conseguem determinar satisfatoriamente as abundâncias das substâncias, representando as condições na superfície. Novo e Shimabukuro (1994) propuseram a determinação da constituição de

águas continentais tropicais em função da mistura espectral entre os três principais COAs (sedimentos em suspensão, fitoplâncton e matéria orgânica).

O MLME se aproveita da elevada dimensionalidade dos dados hiperespectrais para identificar a relativa contribuição entre diferentes substâncias na composição de um pixel. Os espectros de reflectância das substâncias que compõem a mistura dos pixels em uma cena de imagem podem ser medidas individualmente no estado ‘puro’, usando espectrorradiômetros em laboratório ou em campo, mas também podem ser extraídos das próprias imagens hiperespectrais (Aspinall et al., 2002). Estas medidas de espectros de reflectância são chamadas de Membros de Referência (*endmembers*) e apresentam características espectrais peculiares da substância que cada um representa.

2.7.1 Seleção dos Membros de Referência

A seleção de Membros de Referência (MRs) é um passo importante para que a aplicação do MLME seja bem sucedida, pois estes são usados para explicar a informação espectral contida na cena. O conjunto ideal de MRs deve apresentar espectros que quando combinados linearmente sejam capazes de reproduzir qualquer espectro da cena sob análise. Diversos procedimentos vêm sendo desenvolvidos para selecionar os MRs.

O procedimento desenvolvido pela equipe *Analytical Imaging and Geophysics* LLC (AIG) foi aplicado por Kruse et al. (2003) em um estudo comparativo entre as capacidades de mapeamento de minerais por imagens hiperespectrais do sensor orbital Hyperion/EO-1 e do sensor aerotransportado *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS). O aspecto fundamental que esta metodologia proporciona é a redução de dados em ambas as dimensões espectral e espacial, para facilitar a localização e identificação de pixels que servirão como MRs. Os Membros de Referência (MRs) devem ser extraídos de pixels ‘puros’ da imagem, ou seja, o GIFOV de cada pixel selecionado deve ser inteiramente coberto por apenas uma determinada substância de interesse ao mapeamento. A metodologia, sugerida em Kruse (2003) e Kruse et al. (2003), apresenta os seguintes passos para selecionar MRs a partir de imagens hiperespectrais (Figura 2.9):

- 1) transformação linear dos dados de reflectância usando a técnica de fração mínima de ruído (*Minimum Noise Fraction* – MNF), para minimizar o ruído e determinar a dimensionalidade dos dados espectrais (Green et al., 1988);
- 2) localização dos pixels espectralmente mais “puros” pela técnica Índice de Pureza de Pixel (*Pixel Purity Index* - PPI) (Boardman, 1995; Kruse, 2003);
- 3) inspeção da dispersão dos pixels puros, candidatos a MRs, em um visualizador n-dimensional. Os eixos do espaço de atributos são compostos pelas bandas MNF e são rotacionados até que os MRs sejam evidenciados nas extremidades da dispersão;
- 4) identificação das substâncias que compõem os pixels dos MRs coletados.

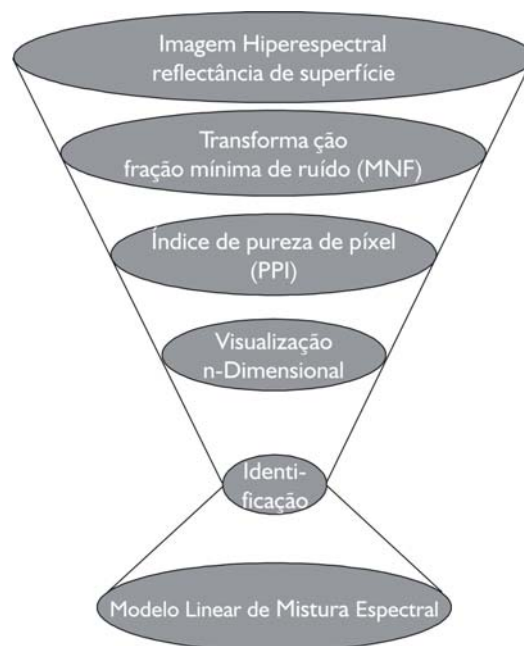


Figura 2.9 - Procedimento para seleção de Membros de Referência.
FONTE: adaptado de Kruse et al. (2003).

Este procedimento foi testado com sucesso em diversas análises de imagens hiperespectrais, voltadas para diferentes áreas de aplicação (p.ex., Kruse, 2003; Kruse et al., 2003; McGwire et al., 2000). As suas etapas estão implementadas no aplicativo *Environment for Visualizing Images* (ENVI) (Research Systems Inc., 1999) e serão descritas de forma mais detalhada a seguir.

2.7.1.1 Transformação Fração Mínima de Ruído

A transformação fração mínima de ruído (MNF) é usada para determinar a dimensionalidade inerente aos dados de uma imagem hiperespectral, separar dados ruidosos e reduzir a demanda computacional para os processamentos subsequentes (Kruse et al., 2003). A imagem é submetida a duas transformações sequenciais que ordenam os dados de acordo com a relação sinal/ruído (SNR) (Green et al., 1988). A primeira transformação se baseia em uma matriz de covariância de ruídos estimados de modo a de-correlacionar e re-escalonar o ruído. Esta transformação resulta em um conjunto de bandas caracterizadas por variância igual a um e ausência de correlação entre as bandas.

A segunda transformação é realizada conforme a técnica padrão de Análise por Componentes Principais (Green et al., 1988), resultando em um novo conjunto de bandas que é ordenado segundo os autovalores de variância das bandas. A ordem crescente das bandas implica em aumento do nível de ruído, indicado pela menor variância. Assim, com base nos resultados MNF, os dados são divididos em duas partes: uma primeira parte composta pelas bandas MNF de menor ordem (maior variância), apresentando imagens espacialmente coerentes com autovalores maiores; e uma segunda parte associada às bandas MNF de maior ordem (menor variância), apresentando imagens ruidosas com autovalores próximos a unidade. As bandas MNF da segunda parte são dispensadas e as bandas MNF da primeira parte são selecionadas como canais de entrada para a aplicação da técnica PPI (Índice de Pureza de Pixel). O número de bandas MNF da primeira parte representa a dimensionalidade dos dados.

A Figura 2.10 demonstra que os dados do sensor AVIRIS de maior SNR reproduzem autovalores maiores em relação aos dados Hyperion. Assim, a dimensionalidade dos dados AVIRIS é superior, e portanto resulta em imagens MNF com maior variância e coerência espacial. Isto pode ser notado pela comparação visual entre as bandas MNF apresentadas nas Figuras 2.11 e 2.12.

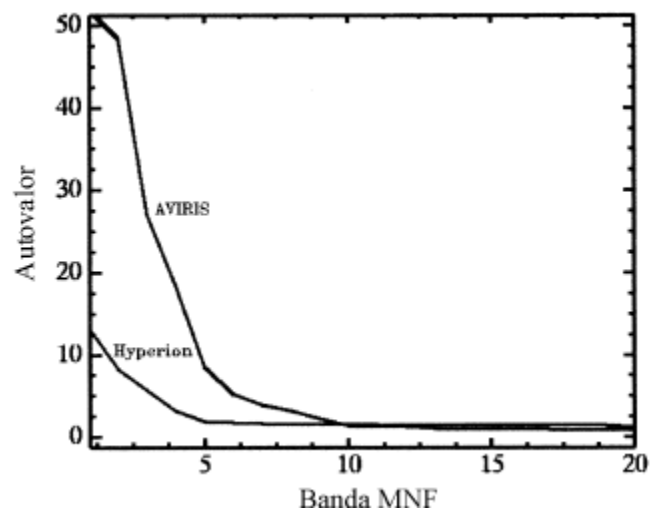


Figura 2.10 - Exemplos de autovalores observados pela transformação MNF para dados SWIR dos sensores Hyperion e AVIRIS, adquiridos em Cuprite, NV.
 FONTE: Kruse et al. (2003)

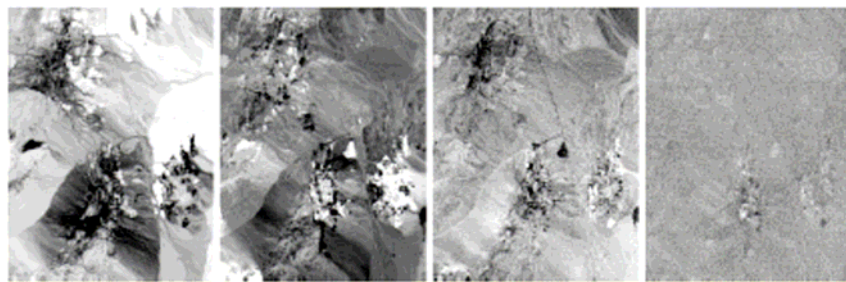


Figura 2.11 - Exemplos de bandas MNF transformadas de dados SWIR do AVIRIS em Cuprite. As bandas dispostas no sentido da esquerda para direita correspondem à seguinte ordem MNF: 1; 5; 10; e 20.
 FONTE: Kruse et al. (2003)

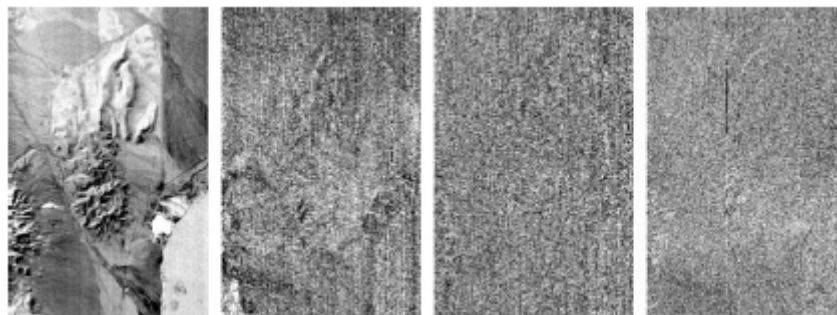


Figura 2.12 - Exemplos de bandas MNF transformadas de dados SWIR do Hyperion em Cuprite. As bandas dispostas no sentido da esquerda para direita correspondem à seguinte ordem MNF: 1; 5; 10; e 20.
 FONTE: Kruse et al. (2003)

2.7.1.2 Índice de Pureza de Pixel

A técnica conhecida por Índice de Pureza de Pixel (PPI) é composta por um conjunto de processamentos que permitem localizar os pixels espectralmente “puros” (Boardman, 1995; Kruse, 2003). As bandas selecionadas pela análise dos autovalores da transformação MNF são usadas para compor um espaço de atributos n-dimensional, onde “n” é o número de bandas selecionadas. O espaço de atributos é preenchido por pontos de coordenadas que consistem de “n” valores que são, simplesmente, os valores de cada pixel para cada banda MNF.

Os eixos do espaço n-dimensional são rotacionados iterativamente em diferentes combinações de projeções geométricas do espaço de atributos (o número de iterações é definido pelo operador). A cada projeção é gerado para cada pixel um vetor unitário e os pixels de valores extremos são registrados. Para determinar quantos pixels devem ser registrados em cada projeção é adotado um limiar que deve ser 2-3 vezes o nível de ruído dos dados (que é 1, quando se usa dados transformados pela técnica MNF). A opção por limiares maiores faz com que o procedimento PPI encontre um maior número de pixels puros, porém, a chance deles serem MRs “puros” diminui. Ao término do processo, quando todas as projeções foram esgotadas, a imagem PPI é gerada de forma que o nível de cinza (NC) de cada pixel é correspondente ao número de vezes que o pixel foi registrado como extremo. O histograma da imagem PPI é analisado para orientar a escolha de um limiar de “pureza”, que é estabelecido para otimizar a seleção dos pixels que deverão permanecer como candidatos a MRs para a etapa seguinte.

2.7.1.3 Visualização n-Dimensional

O espaço de atributos n-dimensional descrito na Seção 2.7.1.2, acima, é reduzido ao grupo de pixels que foram apontados pelo limiar PPI selecionado como candidatos a MRs. A análise da distribuição destes pontos no espaço de atributos n-dimensional proporciona um modo intuitivo de compreensão das características espectrais dos materiais contidos na cena, e orienta a determinação do número de MRs e suas respectivas assinaturas espectrais (Kruse et al., 1993).

Na prática, um visualizador projeta na tela do computador um diagrama de dispersão que representa o espaço de atributos n-dimensional. Este visualizador permite ao operador rotacionar os eixos e alterná-los em diferentes combinações de bandas MNF até atingir posições que evidenciam os MRs por “pontas” ou extremidades expostas pelo diagrama. Por exemplo, no caso em que apenas dois MRs se misturem, os pixels com mistura se apresentarão dispostos em uma linha de mistura e os MRs estarão dispostos nas extremidades. No caso em que três MRs se misturam, então, os pixels estarão inseridos dentro de um triângulo; para uma mistura de quatro Membros de Referência, os pixels estarão contidos dentro de um tetraedro; e assim por diante. Assim, os espectros dos MRs compõem os vértices da forma geométrica da dispersão dos pontos (Figura 2.13), estando no interior de seus intervalos as misturas entre eles. As abundâncias fracionais das substâncias devem ser positivas e a soma equivalente à unidade. Esta premissa é usada para determinar quantos MRs se fazem presentes para modelar a mistura espectral de um pixel, conforme a sua posição no diagrama de dispersão.

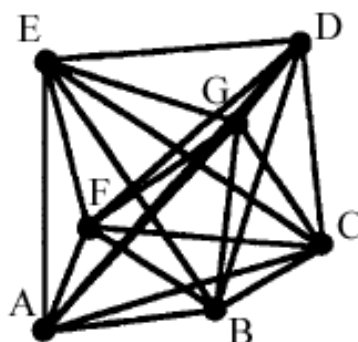


Figura 2.13 - Exemplo de projeção dos Membros de Referência (A-G) compondo os vértices de uma forma geométrica da dispersão dos pontos de mistura espectral.

FONTE: Adaptado de Boardman et al. (1995)

2.7.1.4 Identificação dos Membros de Referência

A identificação de MRs extraídos usando o diagrama de dispersão n-dimensional pode ter como base a combinação da inspeção visual das projeções espectrais e as comparações manuais/automatizadas com bibliotecas espectrais (Kruse, 2003). A

composição física dos MRs extraídos da imagem também pode ser determinada por meio de amostras coletadas em campo, que permitam caracterizar o material ou substância contida no pixel no período em que a imagem em análise foi adquirida. Uma vez que os MRs tenham sido caracterizados e rotulados, estes podem ser utilizados adiante pelos algoritmos de mapeamento espectral/espacial.

2.7.2 Algoritmo do Modelo Linear de Mistura Espectral

O problema descrito pelo modelo físico pode ser simplificado por um modelo matemático mais abstrato que permita sua inversão ou a separação das componentes da mistura. O MLME considera que o espectro de reflectância (R_λ) observado em um pixel (um vetor) pode ser reproduzido por meio do produto de multiplicação do conjunto de MRs (uma matriz) pela abundância fracional que cada MR representa (um vetor). O algoritmo é expresso pela equação (2.1).

$$R_{pi} = \sum f_j r_{ij} + \varepsilon_i \quad (2.1)$$

em que R_{pi} é a reflectância do pixel p na banda i ; f_j é a abundância fracional do MR_j ; r_{ij} é a reflectância na banda i do MR_j ; e ε_i é o erro no comprimento de onda i .

A solução para este modelo linear é baseada em duas premissas: (a) a soma de f deve ser igual a 1; (b) os valores de f serão sempre entre 0 e 1, se os MRs forem espectralmente puros entre os mesmos. O processo de inversão do modelo determina o valor de f_j para cada MR_j . A abundância fracional calculada para cada pixel da imagem é então rearranjada espacialmente e reproduzidas na forma de imagens.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da Figura 3.1 mostra a seqüência metodológica adotada no trabalho. Suas etapas são descritas nos itens subseqüentes.

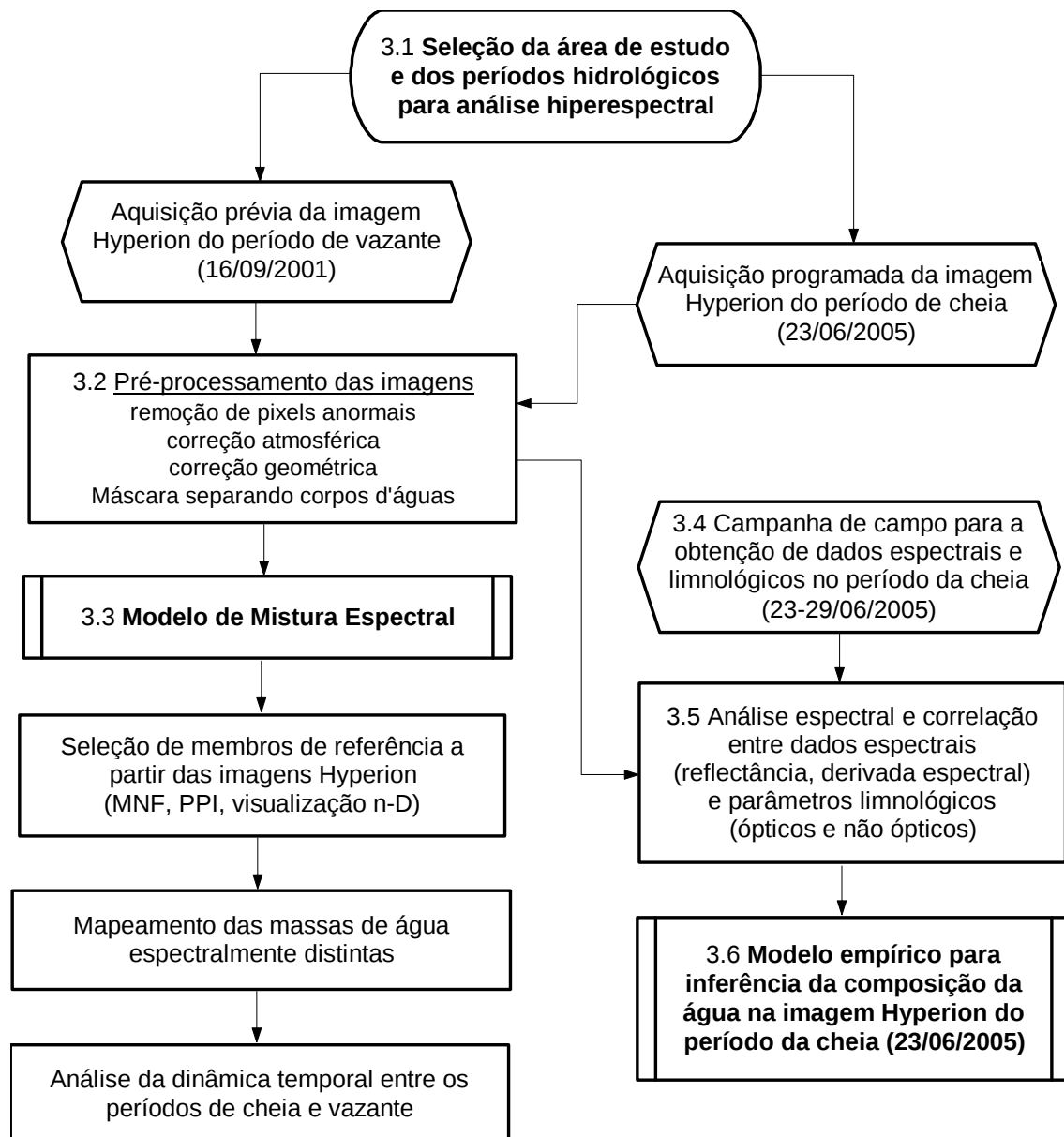


Figura 3.1 - Esquema da metodologia de trabalho.

3.1 Seleção da Área de Estudo e dos Períodos Hidrológicos para Análise Hiperespectral

Existe uma grande diversidade biogeoquímica, geomorfológica e sócio-econômica dos ambientes alagáveis ao longo da calha do Rio Solimões-Amazonas. A área de planície de inundação selecionada como área de estudo foi definida em função da representatividade dos três principais tipos de água amazônica (águas claras, brancas e pretas). A região próxima à Santarém, situada na transição entre a média e a baixa planície de inundação fluvial do Rio Amazonas, foi escolhida como área de estudo (Figura 3.2). Outro fator que contribuiu para a escolha da região de Santarém foi a existência de infra-estrutura logística na região, decorrente de outras pesquisas científicas em andamento (projeto GEOMA e LBA-LC07), o que facilitou o acesso ao local para a campanha de coleta de dados de campo.

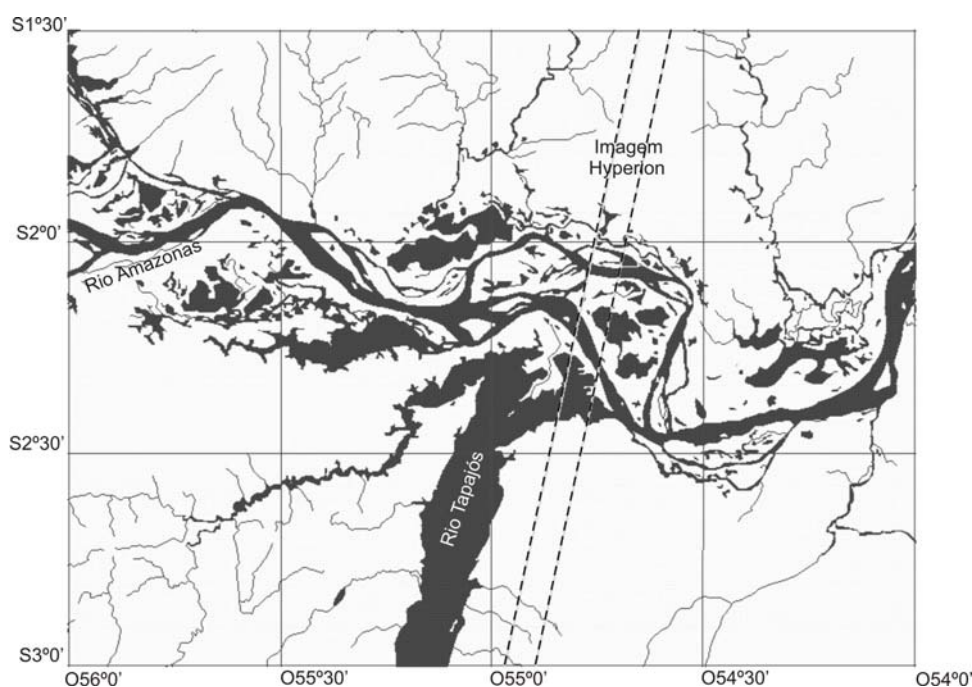


Figura 3.2 - Localização geográfica da área de estudo. A faixa de imageamento do Hyperion é indicada pelas linhas tracejadas.

3.1.1 Escolha dos Períodos Hidrológicos

A dinâmica de alagamento da planície está relacionada às precipitações locais, mas a sua principal forçante é o pulso de inundação do rio Amazonas. Barbosa (2005)

identificou quatro períodos hidrológicos importantes para estudar o efeito da sazonalidade sobre a composição das massas de águas na planície do Lago Grande de Curuai, situada poucos quilômetros à montante da área considerada no presente estudo. A Figura 3.3 ilustra a seqüência dos períodos de seca, enchente, cheia, vazante e suas respectivas direções de fluxo observadas entre o sistema rio/planície. Adotando a definição desses quatro períodos, Barbosa (2005) identificou, com base na série histórica de cotas registrada em Óbidos, as datas ideais para a aquisição de dados representativos da dinâmica do pulso de inundação do rio Amazonas (Tabela 3.1).

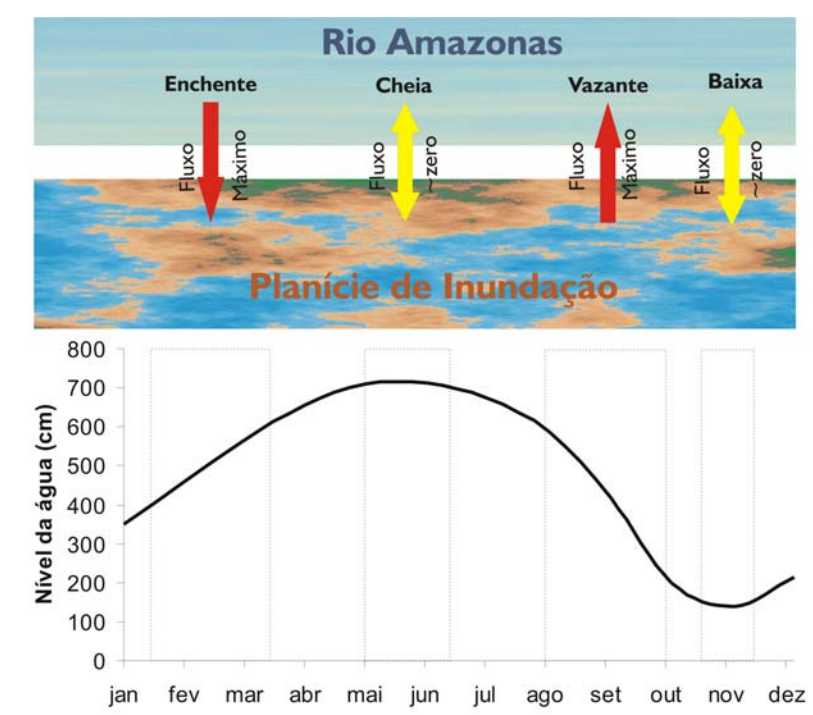


Figura 3.3 - Direção do fluxo durante cada período considerado relevante para estudo da dinâmica de circulação e composição da água no sistema rio Amazonas/planície de inundação.
FONTE: Adaptado de Barbosa (2005).

Tabela 3.1 - Datas identificadas por Barbosa (2005) para aquisição de dados representativos aos quatro períodos hidrológicos.

Períodos	Enchente	Cheia	Vazante	Baixa
Datas	01/01 a 22/02	18/05 a 30/06	18/08 a 17/10	12/11 a 01/12

Com base na identificação dos períodos representativos da dinâmica de circulação da água na planície, o próximo passo foi fazer uma consulta ao acervo de dados Hyperion do *Earth Resources Observation & Science (EROS) Data Center* (<http://edc.usgs.gov/products/satellite/eo1.html>), de modo a avaliar a disponibilidade de imagens nas fases críticas do ciclo hidrológico. Essa consulta também orientou o planejamento de uma nova aquisição de imagem Hyperion e da campanha de coleta de dados em campo, para proporcionar dados orbitais com verdade terrestre em um dos períodos mostrados na Tabela 3.1.

3.1.2 Aquisição das Imagens Hyperion/EO-1

Uma consulta feita ao banco de dados do EROS *Data Center* constatou a existência de uma imagem Hyperion previamente adquirida no período de vazante (imagem **EO1H2270622001259111PF_SGS_01** de 16 de Setembro de 2001, ver Tabela 3.2). A faixa de imageamento no Estado do Pará cruza a planície de inundação; passa ao norte pela cidade de Alenquer; inclui o aeroporto de Santarém na parte sul da planície de inundação; e se estende ainda por alguns quilômetros ao longo do Parque Nacional da Floresta do Tapajós. Esta imagem Hyperion satisfaz os critérios desejados para o presente estudo, pois nela estão presentes os três principais tipos de massas de águas que podem ser encontradas na bacia hidrográfica Amazônica (águas claras, águas pretas e águas brancas).

Para representar o período de cheia foi programada uma nova aquisição de imagem pelo sensor Hyperion, com aquisição simultânea de dados espectrais e limnológicos de campo. A imagem **EO1H2270612005174110PV_PF1_01** (Tabela 3.2) foi adquirida com sucesso no dia 23 de junho de 2005, sobre a mesma faixa recoberta pela cena anterior.

As duas imagens Hyperion (16/09/2001 e 23/06/2005) disponíveis para este estudo abrangem, portanto, dois (vazante e cheia) dentre os quatro períodos hidrológicos considerados importantes por Barbosa (2005) para a compreensão das modificações sazonais na composição da água induzidas pelo pulso de inundação. A Tabela 3.2 resume as condições observadas durante as aquisições e a Figura 3.4 mostra as imagens

Hyperion em composições coloridas normais. A área alagada contida nestas imagens será referida neste documento como Planície de Inundação Alenquer-Santarém (PIAS). O conjunto de corpos d'águas deste trecho da planície é composto pelos rios Amazonas e Tapajós (sistemas lóticos) e inúmeros lagos (sistemas lênticos).

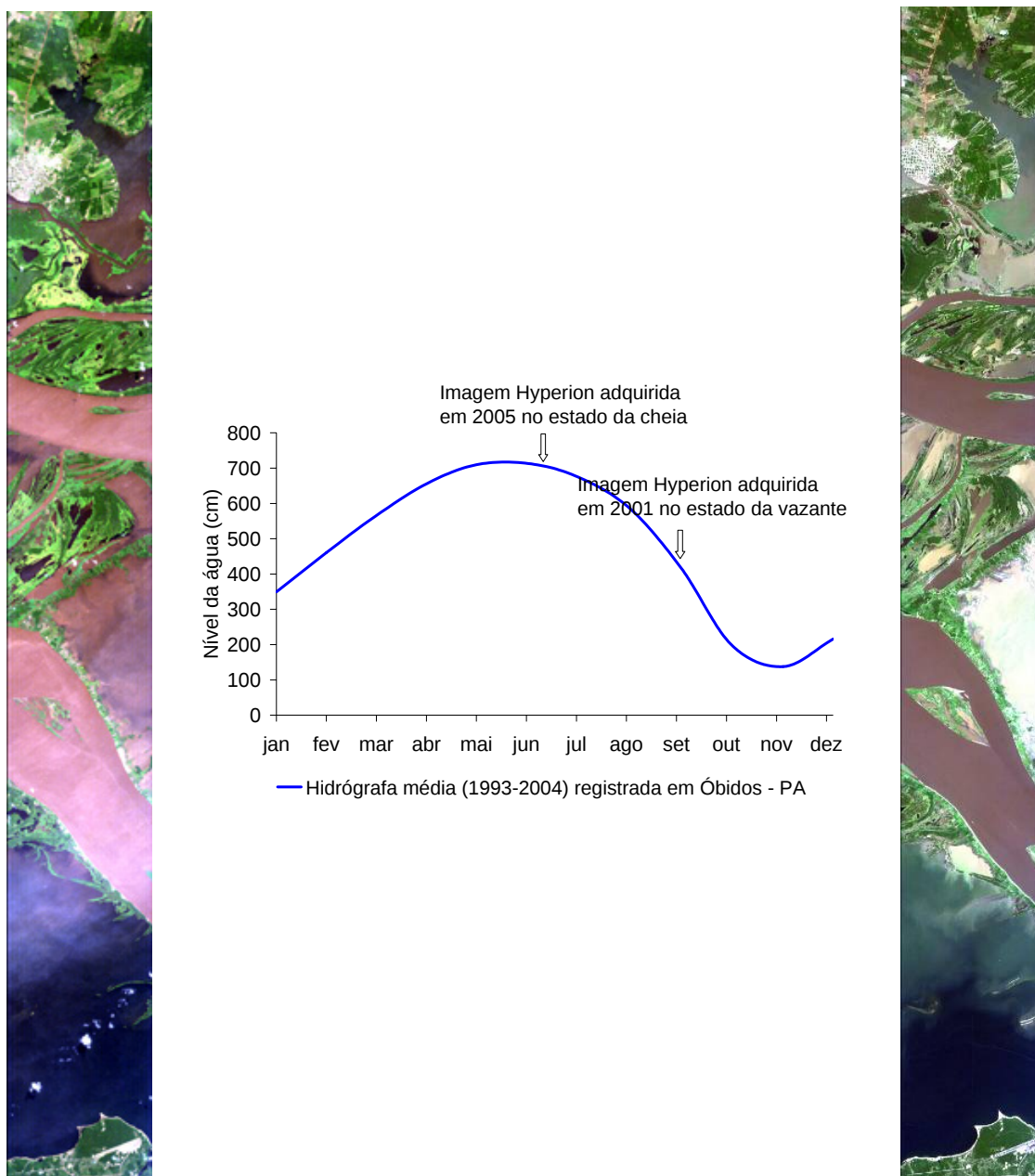


Figura 3.4 - Imagens Hyperion/EO-1 adquiridas sobre a planície de inundação em 23/06/2005 (esquerda) e 16/09/2001 (direita) e usadas para representar os períodos hidrológicos de cheia e vazante, respectivamente. Imagens em composição colorida normal: 640,5 nm (vermelho); 548,9 nm (verde); 457,3 nm (azul). A hidrógrafa mensal média registrada próximo à área de estudo também é mostrada.

Tabela 3.2 - Informações sobre condições de aquisição das imagens Hyperion.

Período da imagem	Cheia	Vazante
Identificação (ID)	EO1H227061 2005174110PV_PF1_01	EO1H227062 2001259111PF_SGS_01
Data de aquisição	23/06/2005	16/09/2001
Canto NO	1°13'21"S, 54°35'20"O	1°56'14"S, 54°44'39"O
Canto NE	1°14'14"S, 54°31'16"O	1°57'07"S, 54°40'35"O
Canto SO	3°02'14"S, 54°58'32"O	3°41'25"S, 55°07'01"O
Canto SE	3°03'06"S, 54°54'28"O	3°42'17"S, 55°02'57"O
Início da gravação da cena	2005:174:13:38:09.025	2001:259:13:37:24.368
Fim da gravação da cena	2005:174:13:38:40.025	2001:259:13:37:54.368
Azimute do sol	47,733224	79,99668
Elevação solar	50,633761	60,294326
Ângulo de visada	-4,7569	-4,4794

FONTE: U. S. Geological Survey (<http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer>).

3.2 Pré-Processamento das Imagens Hyperion/EO-1

3.2.1 Remoção de Pixels Anômalos

Mesmo após as correções radiométricas disponibilizadas para os usuários, ainda restam nas imagens Hyperion pixels ruidosos ou anômalos na forma de “faixas escuras” perpendiculares à linha de varredura (*stripping*). Estes ruídos são introduzidos devido a fatores como a não-linearidade dos detectores, deslocamento da abertura do componente óptico em relação ao plano focal e efeitos de temperatura. O padrão destas faixas de pixels anômalos pode ser notado visualmente em algumas bandas individuais (Figura 3.5).

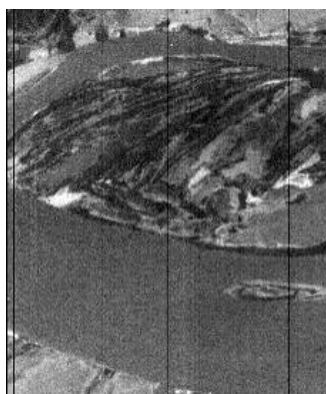


Figura 3.5 - Presença de ruído na forma de faixas escuras verticais observadas na imagem da Banda 10 (447 nm) da cena EO1H-16/09/2001.

Foi, portanto, necessário adotar um procedimento de remoção de pixels anômalos sobre as duas cenas Hyperion. Han et al. (2002) desenvolveram um algoritmo de detecção e remoção de pixels anômalos dispostos em quatro tipos de faixas nas imagens Hyperion: contínuas com valores de nível de cinza (NC) atípicos; contínuas e com valores de NC constantes; intermitentes com valores de NC atípicos; e intermitentes com valores de NC baixos.

As faixas de pixels anômalos foram identificadas nas duas cenas Hyperion por inspeção visual de cada banda. Esta inspeção foi parcialmente orientada pelos resultados obtidos por Goodenough et al. (2003) e Han et al. (2002), pois as faixas de pixels anômalos tendem a re-ocorrer em algumas colunas de bandas da imagem Hyperion. Os pixels com ruídos nas faixas foram substituídos pela média de seus vizinhos na direção horizontal.

3.2.2 Correção Atmosférica e Geométrica

As análises hiperespectrais exigem que os dados estejam transformados para reflectância de superfície. Para corrigir os efeitos atmosféricos sobre as duas cenas Hyperion, foi utilizado o modelo ACORN (ver Seção 2.4). Das 242 bandas disponíveis, apenas aquelas radiometricamente calibradas e que se encontravam fora da faixa espectral de intensa interferência pelo vapor d'água na atmosfera (em torno de 1400 nm e 1900 nm) foram utilizadas para fins de correção atmosférica (157 bandas). Os seguintes parâmetros de especificações do instrumento e de condições de aquisição da imagem foram inseridos no modelo ACORN: altitude do sensor; data e hora de aquisição; localização (latitude/longitude, elevação média); e visibilidade da atmosfera.

O parâmetro de visibilidade foi inicialmente estimado e depois reajustado até que os espectros de reflectância aparente resultantes do modelo fossem condizentes com o comportamento espectral tipicamente conhecido de alguns alvos, p.ex., solo, vegetação, e água. O conteúdo de vapor d'água foi derivado pelo modelo considerando os efeitos de absorção sobre a irradiância medida em ambas as bandas posicionadas em 940 nm e 1140 nm.

Após a correção atmosférica, efetivou-se a correção geométrica para cada imagem. Foram posicionados pontos de controle de terreno sobre feições correspondentes sobre a imagem Hyperion e uma imagem TM/Landsat5 orto-retificada, que serviu como referência. Aplicou-se sobre o conjunto de pontos um ajuste polinomial de primeira ordem, seguido pela reamostragem dos pixels da cena Hyperion pelo método de vizinho mais próximo.

3.2.3 Criação de Máscara para Isolar os Corpos D'água

Para isolar as massas de água e facilitar sua análise espectral, máscaras foram criadas e aplicadas individualmente nas imagens Hyperion. Visto que na faixa espectral do infravermelho médio a água absorve praticamente toda radiação incidente, enquanto que os demais componentes de cena apresentam maior reflectância, um simples limiar de reflectância ($< 1\%$) na banda de 2300 nm foi utilizado para gerar a máscara e permitir uma rápida distinção dos corpos d'água. A máscara é uma imagem binária na qual os pixels sobre corpos d'água apresentaram valor 1 e os pixels sobre alvos terrestres e vegetação aquática apresentam valor 0.

3.3 Modelo Linear de Mistura Espectral

3.3.1 Seleção dos Membros de Referência

Em função do alvo de interesse ser a água, a qual absorve fortemente a radiação incidente na faixa do SWIR, o intervalo de análise de reflectância espectral, para as duas cenas Hyperion, foi reduzido ao VNIR (457,34 a 884,7 nm ou bandas 11 a 53). Este intervalo foi aproximadamente correspondente àquele utilizado para fins de medidas espectrorradiométricas de campo. Portanto, para fins de seleção dos Membros de Referência (MRs) para o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e para as etapas subsequentes do trabalho, apenas 43 das 157 bandas de reflectância de superfície do sensor Hyperion foram utilizadas após a aplicação das máscaras.

As 43 bandas de reflectância do VNIR selecionadas para análise foram transformadas linearmente usando a transformação MNF, gerando 43 bandas MNF ordenadas pelos

seus autovalores. Os autovalores de MNF foram projetados em um gráfico que auxiliou a interpretação de seus valores. O conjunto de imagens MNF selecionadas para a aplicação da técnica PPI foi determinado por comparação entre a disposição dos autovalores no gráfico e a qualidade visual das imagens das bandas MNF (Kruse e Boardman, 2000; Kruse et al., 2003).

A técnica PPI, usando a abordagem de geometria convexa, foi aplicada às primeiras bandas MNF correspondentes à dimensionalidade dos dados. Um elevado número de iterações (5.000) foi usado para gerar inúmeras projeções. Os pixels mais extremos em cada projeção foram pontuados como pixels puros.

Uma ferramenta de visualização n-dimensional foi utilizada para examinar a dispersão, no espaço de atributos gerado entre as bandas MNF, dos pixels com as maiores pontuações e aceitos por um limiar de pureza. A ferramenta de visualização permitiu a rotação dos múltiplos eixos de bandas MNF na tela do computador para analisar a coesão de agrupamentos de pontos e evidenciar as extremidades da forma geométrica da dispersão dos pontos. Os pontos dispostos nas extremidades foram selecionados. Como critério final de decisão para selecionar os MRs em cada data, os pixels correspondentes a estes pontos foram examinados pelos espectros de reflectância e localização na imagem.

3.3.2 Mapeamento das Massas de Água Espectralmente Distintas

Para a delimitação das massas de água espectralmente distintas e para fins de análise comparativa entre os dois períodos (cheia e vazante), selecionou-se um conjunto único de MRs a partir da inspeção dos MRs de cada data. Portanto, este conjunto representa de fato os pixels mais puros dos dois períodos hidrológicos sob análise (vazante e cheia). Após a aplicação do MLME, a avaliação dos resultados foi feita observando-se os valores de abundâncias fracionais dos MRs, mapeadas em cada data. O erro do mapeamento foi avaliado pela análise da imagem erro quadrático médio (*root mean square* – RMS).

Para consolidar a análise da distribuição espacial das massas de água, a correlação entre os valores de abundâncias fracionais e os dados limnológicos de campo foi obtida para a imagem Hyperion do período de cheia.

3.3.3 Análise da Dinâmica Temporal entre os Períodos de Cheia e Vazante

Porções da cena Hyperion visitadas em campo sobre a água dos dois rios principais e de alguns lagos foram escolhidas para analisar a dinâmica temporal entre os períodos de vazante e cheia. Os lagos foram escolhidos estrategicamente com base nas mudanças de composição de água entre os períodos, que foram. A priori estas mudanças foram observadas por interpretações visuais com composições coloridas das imagens Hyperion e pelas características espectrais da água.

Os espectros Hyperion de reflectância média destas áreas em cada período de observação foram comparados entre si. Além disso, a variação temporal nas concentrações de Constituintes Opticamente Ativos (COAs) foi analisada qualitativamente a partir da comparação relativa dos valores de abundâncias fracionais dos MRs mapeados nos períodos de vazante e cheia pelo MLME. A comparação foi feita embasada em hipóteses científicas levantadas por estudos realizados em outros trechos da planície de inundação do Rio Amazonas (p.ex., Junk, 1997).

3.4 Coleta de Dados de Campo no Período de Cheia

Uma campanha de coleta de campo foi realizada entre os dias 23 e 29 de junho de 2005, cobrindo 44 pontos distribuídos na área de estudo (Figura 3.6) de forma a se obter uma amostragem representativa de águas com diferentes composições. Um sistema de posicionamento “Global Positioning System” (GPS) foi usado para registrar a localização geográfica dos pontos. Embora o ambiente aquático se encontre em constantes mudanças, a condição de estabilidade do nível de água na cheia ajudou a proporcionar boa representatividade dos dados coletados ao nível de campo, mesmo diante da impossibilidade de amostragem nas estações de coleta de forma totalmente simultânea à aquisição da imagem Hyperion realizada no dia 23 de junho de 2005.

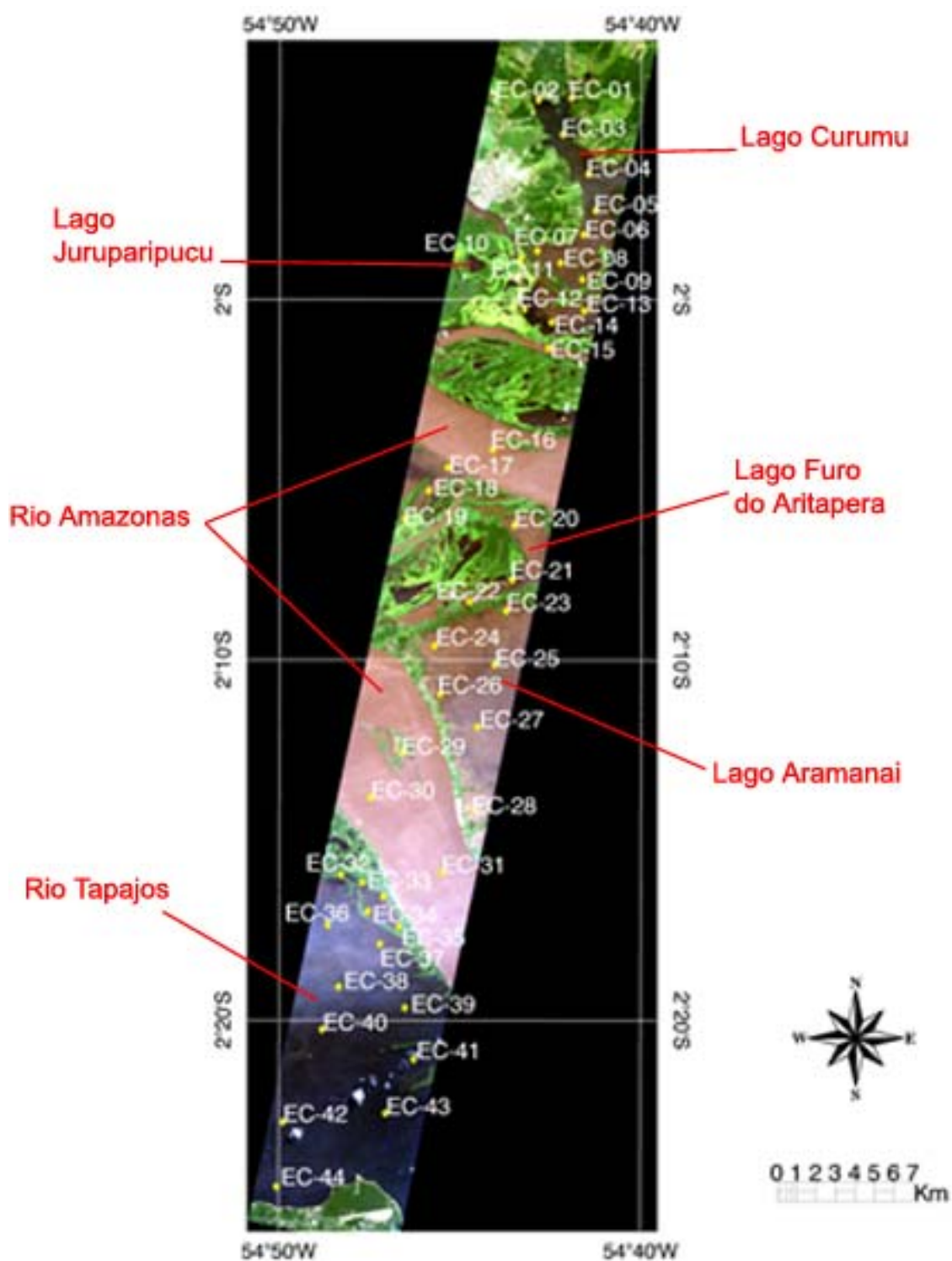


Figura 3.6 - Imagem Hyperion/EO-1 adquirida no período de cheia (23/06/2005), em composição colorida normal: 640,5 nm (vermelho); 548,9 nm (verde); 457,3 nm (azul). Nome dos corpos d'água situados ao longo da PIAS e localização das estações de coleta (EC) de dados em campo.

Em cada estação de coleta (EC), foram realizadas sequencialmente (em menos de 30 s) medidas de radiância da água e da placa de referência de sulfato de bário usando o espectrorradiômetro Spectron SE-590. O Spectron SE-590 mede a radiância com uma resolução espectral de 2,8 nm ao longo da faixa de 350-1100 nm (Milne et al., 1987). O fator de reflectância bidirecional foi calculado (em %) usando a Equação 3.1:

$$R_{\text{água}}(\lambda) = \frac{ND_{\text{água}}(\lambda)}{ND_{\text{placa}}(\lambda)} \times R_{\text{placa}}(\lambda) \quad (3.1)$$

em que $R_{\text{água}}(\lambda)$ é o fator de reflectância bidirecional da água, $ND_{\text{água}}$ é o valor de número digital bruto medido sobre a água, ND_{placa} é o valor de número digital bruto medido sobre a placa de referência, R_{placa} é o fator de reflectância bidirecional da placa de referência e λ é o comprimento de onda.

A amostragem de campo foi realizada entre 10h00m e 14h00m (horário local) para minimizar efeitos de geometria de iluminação e visada do sensor, durante a aquisição dos dados. O Spectron SE590 foi posicionado sobre cada estação de coleta, com orientação de 90° ou mais de azimute solar e 45° de inclinação do sensor em relação à vertical e a uma altura de aproximadamente 2 m acima do nível da água. Imediatamente depois de tomadas as medidas radiométricas, uma amostra de água era coletada a 0,5 m abaixo da superfície da água em garrafas de volume de 5 litros.

Em conjunto, para cada estação de coleta, foram medidos na sub-superfície da água os seguintes parâmetros limnológicos, com o equipamento multi-sensor Horiba U-10: turbidez (NTU), pH, condutividade elétrica (CE) em $\mu\text{S cm}^{-1}$, oxigênio dissolvido (OD) em mg l^{-1} e temperatura em °C. No momento de cada coleta foram feitas observações complementares como: profundidade total (m); profundidade do disco *Secchi* (m); velocidade do vento (m s^{-1}); e percentual de cobertura de nuvens. Observações sobre características da vegetação presente no entorno do local de medição também foram feitas.

As amostras de águas foram armazenadas em frascos e transportadas para serem analisadas em laboratório, visando extrair as concentrações dos seguintes constituintes

da água (ver descrição dos métodos no Apêndice A): Clorofila-*a* (Cl-*a*) em $\mu\text{g l}^{-1}$, baseada no método de Nush (1980); Sedimentos Inorgânicos em Suspensão (SIS) em mg l^{-1} ; Sedimentos Orgânicos em Suspensão (SOS) em mg l^{-1} , baseados no método de Wetzel e Likens (1991); Carbono Inorgânico Dissolvido (CID) em ppm; e Carbono Orgânico Dissolvido (COD) em ppm, baseados no método de análise de gás por infravermelho.

3.5 Análise Espectral da Imagem Hyperion/EO-1 adquirida no Período de Cheia

Os espectros de reflectância de campo foram comparados, quanto à similaridade espectral, com os espectros Hyperion do período de cheia (média de 4 x 4 pixels) extraídos de pixels da cena geograficamente correspondentes aos locais das estações de coleta de dados em campo. Valores de coeficiente de correlação de *Pearson* dos dados de reflectância medidos pelo SPECTRON SE-590 e pelo sensor Hyperion com os dados limnológicos, especialmente os COAs, foram então calculados e comparados entre si. Os espectros resultantes da aplicação de análise derivativa também foram considerados no estudo. Para o cálculo dos coeficientes de correlação, foram utilizados os dados correspondentes a 31 estações de coleta. O restante das estações de coleta (13) foi utilizado para fins de validação das relações empíricas visando a estimativa de COAs na cena Hyperion.

3.5.1 Análise Derivativa por Aproximação Simétrica

Como passo preparatório ao cálculo das derivadas foi utilizado um filtro de média móvel simples de três pontos (bandas) para evitar que ruídos fossem muito amplificados durante a diferenciação. Um filtro de média móvel simples assume o valor espectral médio de todos os pontos dentro de uma janela específica como sendo o novo valor do ponto central da janela. Assim, o novo valor de reflectância ($\tilde{R}$) para o *i*-ésimo elemento pode ser expresso pela Equação 3.2:

$$\tilde{R}_i = \frac{\sum_{j=i-l}^{i+l} R_j}{N} \quad (3.2)$$

em que l é o número de elementos anteriores e posteriores ao elemento corrente i ; e N (número de pontos da janela) é o tamanho do filtro $(2l+1)$.

A primeira derivada do espectro de reflectância com relação ao comprimento de onda x em um determinado ponto i pôde ser aproximada numericamente por um esquema de diferenças finitas usando a aproximação central ou simétrica, expresso pela Equação 3.3:

$$\frac{dR_{\lambda}}{dx} \cong \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.3)$$

em que Δx é a separação entre duas bandas sucessivas. Sendo $\Delta x = x_j - x_k$, considera-se que $x_j > x_k$ e que o intervalo entre as bandas seja constante.

No presente trabalho, a análise derivativa foi aplicada visando aumentar a correlação dos dados espectrais com as concentrações de COAs, a partir da diferenciação entre feições de absorção e espalhamento (ou vice-versa) observadas pelos dados de reflectância em bandas subseqüentes ao longo do espectro.

3.6 Modelo Empírico para Inferência de Constituintes Opticamente Ativos

Os parâmetros espectrais (valores de reflectância e de primeira derivada), indicados pela etapa de análise espectral entre os dados Hyperion e os COAs, foram testados para estimar a concentração destes constituintes pela imagem adquirida no período de cheia (23/06/2005). Conforme mencionado anteriormente, das 44 estações de coleta de dados em campo, 13 estações foram retiradas aleatoriamente para fins de validação do poder de predição das equações de regressão e para determinar o erro *root mean square* (RMS) que foi considerado para avaliar o desempenho dos modelos. Os resultados destas estimativas foram comparados qualitativamente com as imagens de abundâncias fracionais obtidas, na Seção 4.1.4, pelo Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelo Linear de Mistura Espectral

4.1.1 Membros de Referência da Imagem Hyperion do Período de Cheia

A Figura 4.1 ilustra a variação dos autovalores resultantes da aplicação da técnica MNF sobre os valores de reflectância de superfície de 43 bandas do sensor Hyperion posicionadas no VNIR (457,34 a 884,7 nm). Os resultados referem-se à imagem do período de cheia. O gráfico, portanto, é um indicador da dimensionalidade dos dados. A porção coerente dos dados, que retém a maior parte da informação útil, foi determinada pela comparação dos autovalores (Figura 4.1) e da qualidade visual das imagens MNF (Figura 4.2).

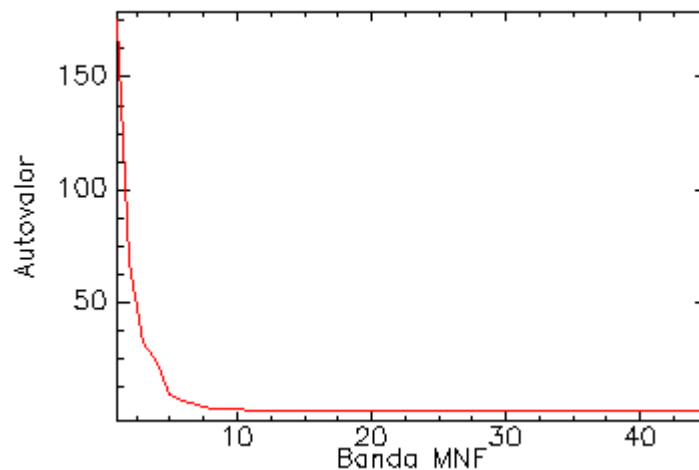


Figura 4.1 - Variação nos autovalores resultantes da aplicação da técnica MNF sobre a imagem Hyperion do período de cheia.

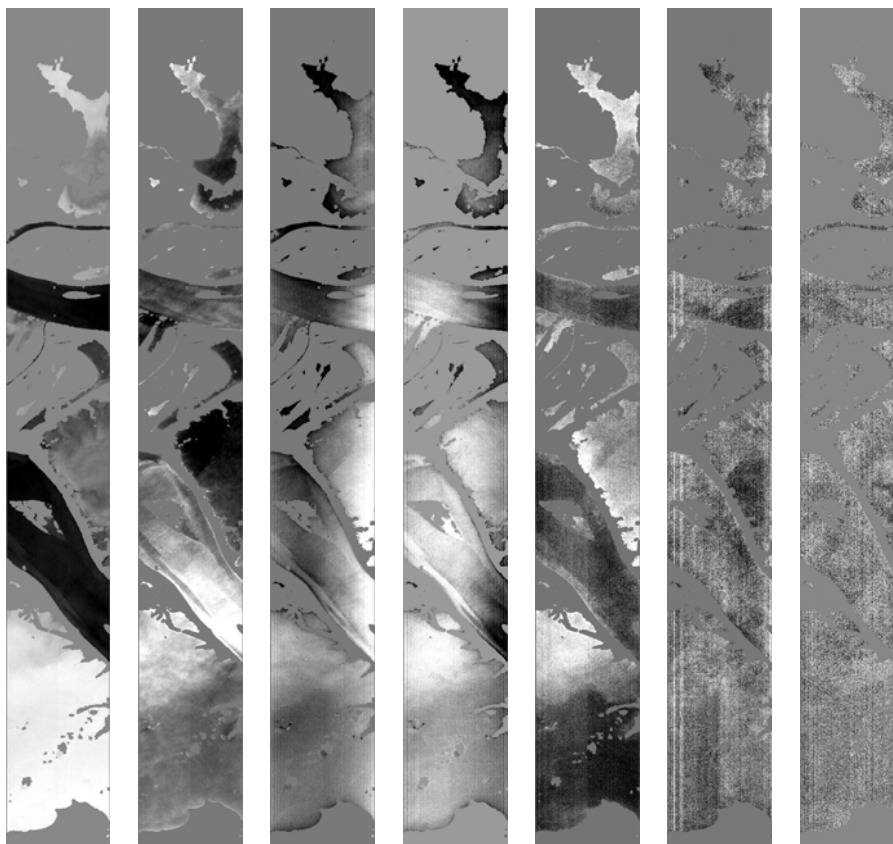


Figura 4.2 - Transformação MNF realizada a partir dos valores de reflectância de superfície de 43 bandas do sensor Hyperion posicionadas no VNIR. A imagem foi obtida no período de cheia (23/06/2005). No sentido da esquerda para direita, estão dispostas as seguintes bandas MNF: 1; 2; 3; 4; 5; 10 e 20.

Foram observados autovalores elevados e maior conteúdo de informação nas três primeiras bandas MNF, que são responsáveis por 71% da variância dos dados. Os autovalores decaíram rapidamente para o restante das bandas. Verificou-se que após a décima banda MNF, as imagens se apresentavam bastante ruidosas e com autovalores próximos a 1.

A técnica de índice de pureza de pixel (PPI) foi aplicada sobre as primeiras 10 bandas MNF, com a finalidade de reduzir o número de pixels a serem analisados como candidatos a Membros de Referência (MRs) pela etapa de análise visual n-dimensional. Após completar 5.000 iterações, 17.464 pixels foram pontuados como ‘puros’. Desta forma, considerando as melhores pontuações aceitas pelo limiar de pureza (2,5),

restaram 9.302 pixels candidatos a MRs, o que representa menos de 3% de toda área alagada que foi imageada.

A análise visual n-dimensional permitiu identificar alguns casos indesejados para a modelagem da mistura espectral entre os Constituintes Opticamente Ativos (COAs). Foram observados pontos nas extremidades da dispersão que correspondiam na imagem Hyperion a pixels afetados por brumas, variações de reflexão pela superfície da água (ver Seção 2.2), plantas aquáticas que não puderam ser totalmente removidas pela máscara, além de alguns pixels com ruído em seus espectros. Estes casos foram descartados como possíveis MRs.

Assim, três MRs foram selecionados na imagem do período de cheia para representar água clara no estado livre de COAs e águas espectralmente dominadas por matéria orgânica dissolvida e sedimentos em suspensão (Figura 4.3). Esses três MRs não representam exatamente todas as extremidades distintas que puderam ser identificadas no espaço MNF, mas são os MRs de maior significado em termos de distribuição espacial de massas de águas na cena Hyperion deste período.

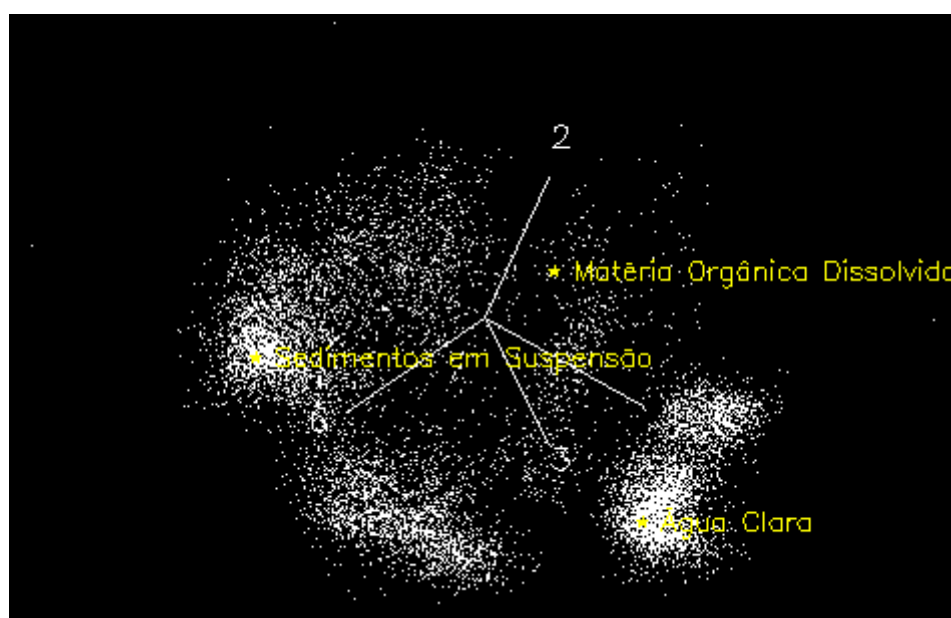


Figura 4.3 - Visualizador n-Dimensional: espaço de atributos gerado entre as bandas MNF 1, 2, 3 e 6 para os 9.302 pixels indicados pela técnica PPI. Os Membros de Referência selecionados estão identificados na nuvem de dispersão.

A Figura 4.4 mostra os locais na imagem Hyperion onde foram extraídos os três MRs representativos do período de cheia e os seus respectivos espectros de reflectância (média de três pixels para sedimentos em suspensão e matéria orgânica dissolvida e cinco pixels para água clara).

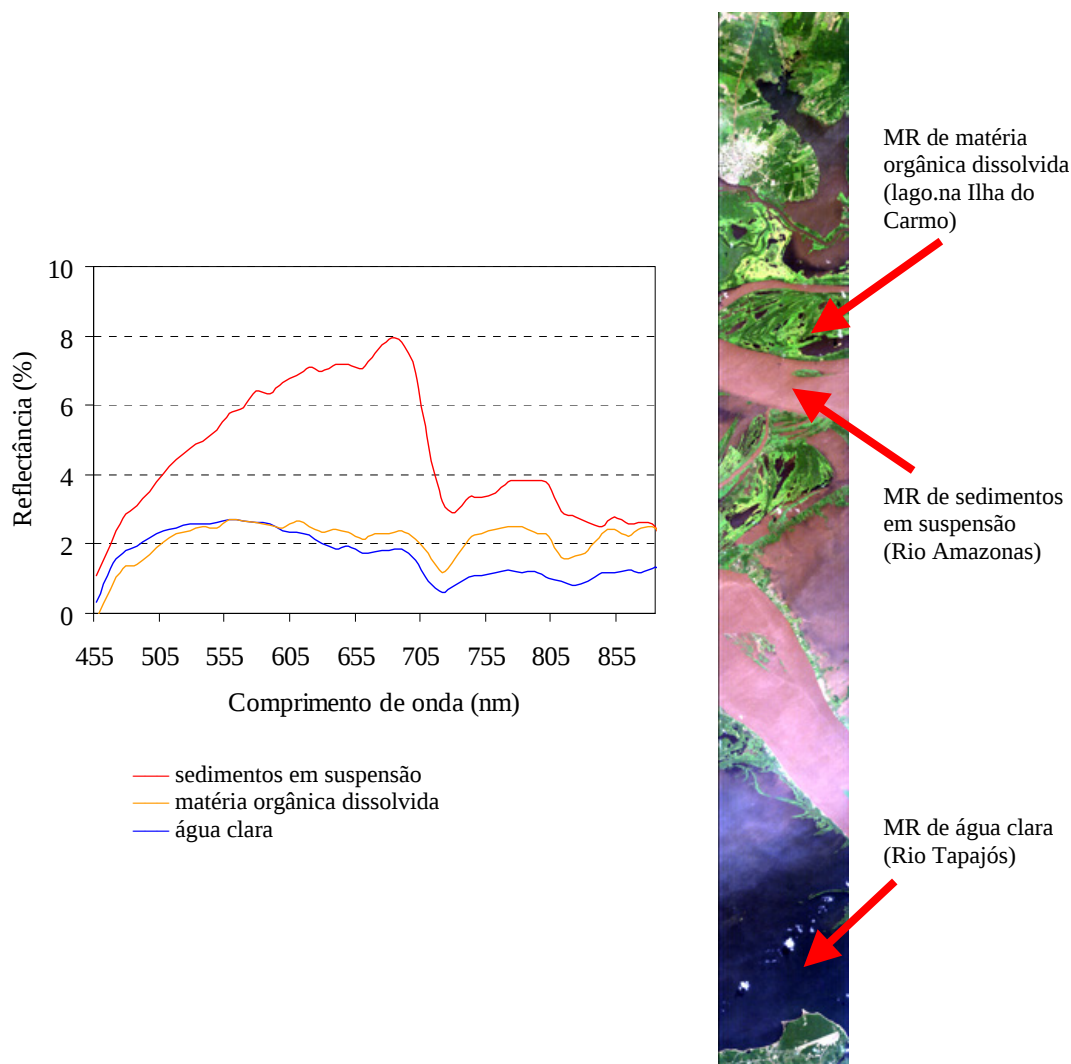


Figura 4.4 - Localização dos pixels selecionados como Membros de Referência na imagem Hyperion do período de cheia (23/06/2005). Os espectros de reflectância média são ilustrados.

O Membro de Referência (MR) de sedimentos em suspensão (média de três pixels) foi extraído sobre a porção da cena correspondente ao braço norte do rio Amazonas. Conforme mencionado anteriormente, as águas brancas do rio Amazonas apresentam elevadas concentrações de sedimentos inorgânicos em suspensão. O espectro da água do rio Amazonas é caracterizado por um aumento de reflectância em toda a faixa espectral,

quando comparado aos outros dois espectros mostrados na Figura 4.4, mas de forma mais intensa entre 580 nm e 700 nm (Barbosa, 2005; Chen et al., 1992).

O Membro de Referência (MR) de matéria orgânica dissolvida (média de três pixels) foi extraído de um lago protegido na Ilha do Carmo na porção norte da cena. Por ser um lago cercado por vegetação, os sedimentos em suspensão se decantam com maior facilidade e as águas provindas do lençol freático trazem consigo substâncias orgânicas lixiviadas (Junk, 1997). As substâncias húmicas dissolvidas provocam absorção na faixa de comprimento de onda do azul e espalhamento por fluorescência, principalmente, a partir da faixa de comprimento de onda do vermelho entre 605 nm e 705 nm, e do IVP entre 721 e 885 nm (Kirk, 1994). Isto explica, de forma geral, o aspecto escuro desta água na composição colorida da Figura 4.4.

O Membro de Referência (MR) de água clara (média de 5 pixels) compreendeu pixels sobre as águas do Rio Tapajós. Estas águas apresentam concentrações bem reduzidas de sedimentos em suspensão e substâncias orgânicas dissolvidas. Desta forma, a sua reflectância média na faixa do VNIR é a mais baixa. O espalhamento na faixa de comprimento de onda do azul se deve as moléculas de água pura e é responsável pelo ligeiro aumento da reflectância no azul (Kirk, 1994).

A seleção de um MR para representar o fitoplâncton na cena do período de cheia foi descartada. Embora a concentração máxima de *Chl-a* medida em campo tenha sido de $48,8 \mu\text{g l}^{-1}$, sua proporção em relação aos demais COAs não foi suficientemente alta para gerar um espectro de reflectância característico de água cuja cor é dominada pela presença do fitoplâncton (Barbosa, 2005; Kirk, 1994).

4.1.2 Membros de Referência da Imagem Hyperion do Período de Vazante

A Figura 4.5 ilustra a variação dos autovalores resultantes da aplicação da técnica MNF sobre os dados de reflectância de 43 bandas (457,34 a 884,7 nm) da imagem Hyperion adquirida no período de vazante. Verificou-se que a relação sinal/ruído (SNR) para a cena adquirida em 16/09/2001 se apresentou 20% mais elevada em relação à da cena adquirida em 23/06/2005. Observaram-se autovalores elevados e maior conteúdo de

informação nas três primeiras bandas MNF, que são responsáveis por 71% da variância dos dados. Após a décima componente, as bandas MNF se apresentavam com autovalores próximos a 1 (Figura 4.5) e suas imagens bastante ruidosas (Figura 4.6). A presença de áreas escuras sobre a parte direita da quarta banda MNF, apontada pela seta vermelha na Figura 4.6, é decorrente de problemas de calibração do sensor Hyperion (Gao et al., 2004).

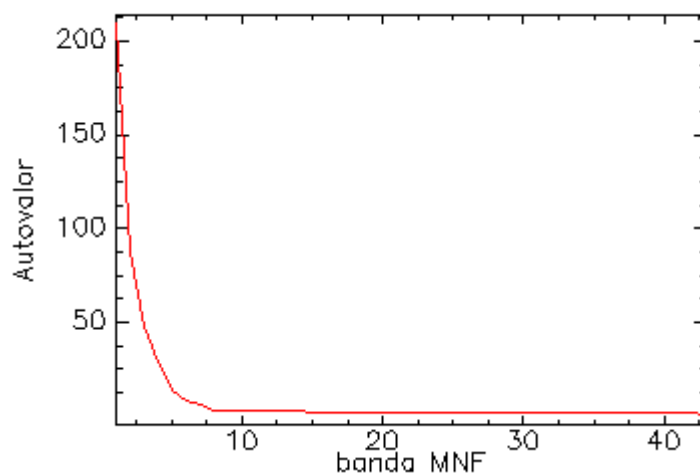


Figura 4.5 - Variação nos autovalores resultantes da aplicação da técnica MNF sobre a imagem Hyperion do período de vazante.

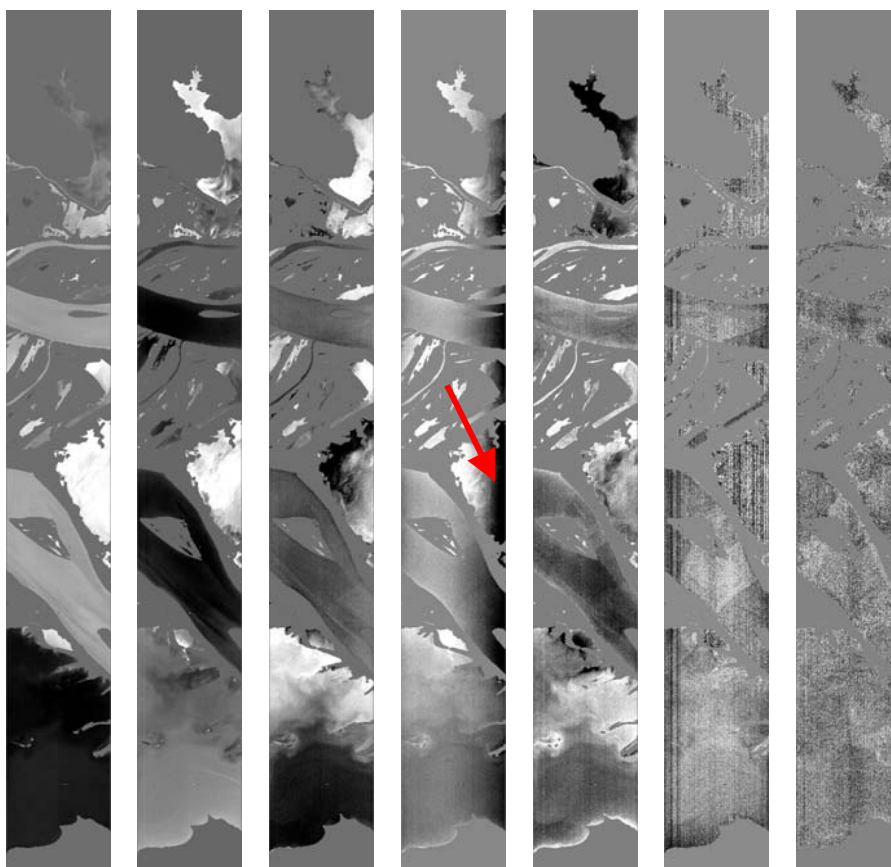


Figura 4.6 - Transformação MNF realizada a partir dos valores de reflectância de superfície de 43 bandas do sensor Hyperion posicionadas no VNIR. A imagem foi obtida no período de vazante (16/09/2001). No sentido da esquerda para direita, estão dispostas as seguintes bandas MNF 1; 2; 3; 4; 5; 10 e 20.

A técnica de índice de pureza de pixel (PPI) foi aplicada sobre as primeiras 10 bandas MNF e após completar 5.000 iterações, 16.489 pixels foram pontuados como ‘puros’. Considerando as melhores pontuações aceitas pelo limiar de pureza (2,5), restaram 9.961 pixels como candidatos a MRs, o que representa 3,6% da área alagada imageada.

Quatro MRs foram selecionados na imagem do período de vazante para representar água clara no estado livre de COAs e águas espectralmente dominadas por matéria orgânica dissolvida, sedimentos em suspensão e fitoplâncton (Figura 4.7). Assim como no caso da imagem do período de cheia, os MRs selecionados não representam exatamente todas as extremidades distintas que puderam ser identificadas no espaço

MNF, mas são os MRs de maior significado em termos de distribuição espacial de massas de águas na cena Hyperion deste período.

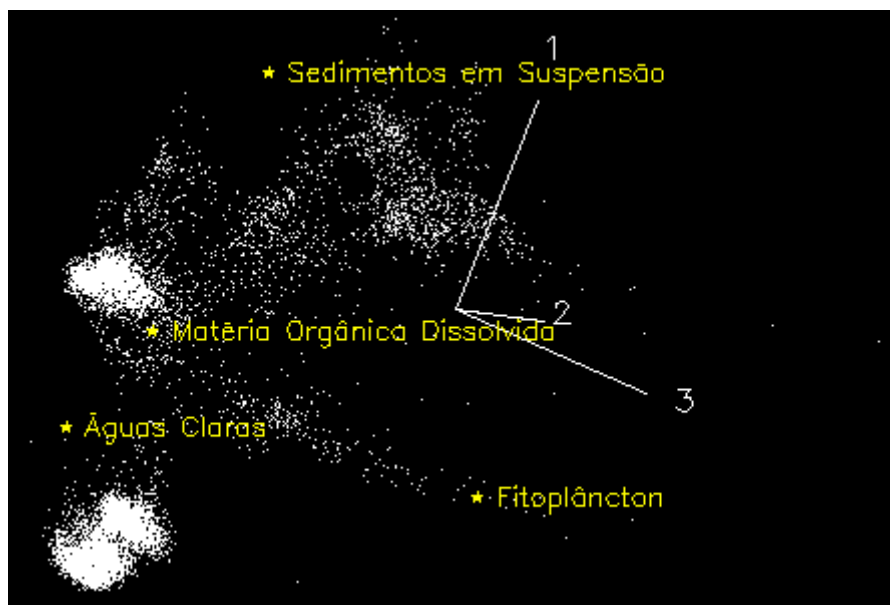


Figura 4.7 - Visualizador n-Dimensional: espaço de atributos gerado entre as bandas MNF 1, 2 e 3 para os 9.964 pixels indicados pela técnica PPI. Os Membros de Referência selecionados estão identificados na nuvem de dispersão.

A Figura 4.8 mostra os locais de seleção dos MRs na imagem Hyperion e seus espectros de reflectância (média de três pixels). Durante a vazante, a água escoava predominantemente da planície para o rio e o nível de água diminuiu. Além do volume de água se tornar menor, a ressuspensão de sedimentos decantados no fundo e expostos ao longo das margens se intensifica, ocasionando situações de águas com concentrações elevadíssimas de sedimentos em suspensão. Isto ocorre com mais frequência nos lagos abertos e rasos por serem mais susceptíveis à ação do vento e da correnteza na água. Assim, o MR de sedimentos em suspensão selecionado não se posicionou mais sobre o rio Amazonas como no estado da cheia, mas sobre um lago de águas rasas e bastante turbidas (lago na Ilha dos Guaribas, ver Figura 4.8).

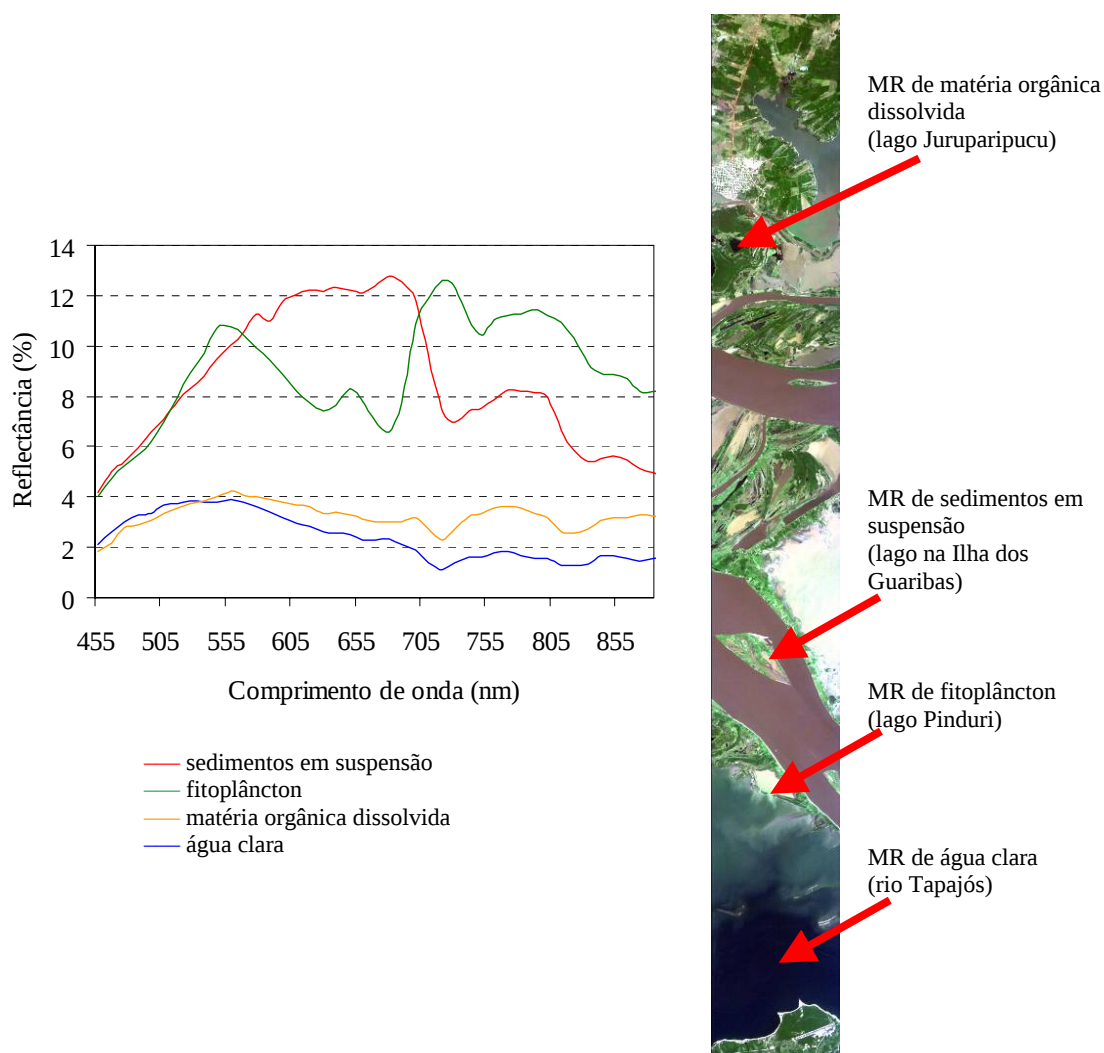


Figura 4.8 - Localização dos pixels selecionados como Membros de Referência na imagem Hyperion do período de vazante (16/09/2001). Os espectros de reflectância (média de três pixels) são ilustrados.

As florações de fitoplâncton se intensificam na vazante, principalmente, em lagos onde há mistura com sedimentos em suspensão. Nestes casos o fitoplâncton ocorre próximo à superfície da água, pois a zona eufótica é limitada. Conforme pode ser visto na Figura 4.8, o espectro deste MR (lago Pinduri) apresenta duas fortes feições de absorção no azul e no vermelho devido aos pigmentos fotossintéticos (Kirk, 1994). Ao mesmo tempo, as células do fitoplâncton provocam espalhamento da radiação na faixa do IVP (Dekker, 1993; Gitelson et al., 2000).

No período de vazante, as principais características espectrais dos MRs de água clara (rio Tapajós) e matéria orgânica dissolvida (lago Juruparipucu) não se modificam em

relação ao que foi observado no estado da cheia. Uma pequena diferença observada nos espectros dessas águas no período de vazante foi notada pela a reflectância média ser um pouco maior e o pico de reflectância em 559 nm ser mais bem definido. Estas características são indícios de que tais águas possuem maior quantidade de fitoplâncton distribuído na coluna d'água durante a vazante, embora ainda em baixa concentração.

4.1.3 Seleção Final dos Membros de Referência

Para fins de aplicação do MLME, um conjunto único de MRs foi utilizado. Este conjunto foi selecionado com base na inspeção dos espectros da Figura 4.4 (período de cheia) e da Figura 4.8 (período de vazante).

O nível de água é mais elevado no período de cheia e o estado de estabilidade de troca de água entre o sistema rio-planície favorece a decantação das partículas em suspensão. Isto faz com que os nutrientes também se encontrem de forma mais diluída na água. Assim, em termos gerais, a produção de fitoplâncton é mais baixa no período de cheia. No período de vazante existem situações de águas brancas com maior concentração de sedimentos em suspensão, e as condições hidroquímicas e de nutrientes na água são mais favoráveis à ocorrência de florações de fitoplâncton (Barbosa, 2005; Junk, 1997).

Esses fatos, aliado às características espectrais observadas nos MRs pré-selecionados nos dois períodos, justificam a decisão de usar os MRs extraídos da imagem do período de cheia, com menores valores de reflectância no VNIR, para o mapeamento de água clara e matéria orgânica dissolvida. Por outro lado, os MRs extraídos da imagem do período de vazante mostram-se mais adequados para o mapeamento de sedimentos em suspensão e de fitoplâncton. Portanto, o MLME foi aplicado às duas cenas Hyperion considerando os quatros MRs representados na Figura 4.9.

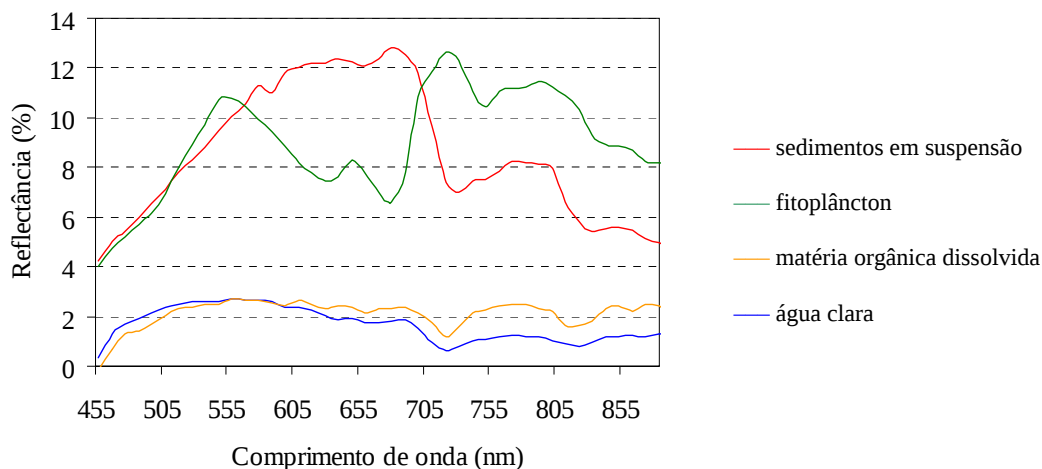


Figura 4.9 - Conjunto final de Membros de Referência utilizados para a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral.

Os Membros de Referência (MRs) de água clara e de matéria orgânica dissolvida possuem baixas reflectâncias espectrais e, portanto, são considerados neste estudo como “MRs bases”. Por outro lado, os sedimentos em suspensão e fitoplâncton são COAs que provocam o aumento de reflectância na água e, portanto, seus MRs são considerados como “MRs dominantes”.

4.1.4 Mapeamento Espectral da Imagem Hyperion/EO-1 do Período de Cheia

A Figura 4.10 representa, na forma de imagens escalonadas em níveis de cinza, as abundâncias fracionais de cada MR considerado: água clara ($f_{\text{água clara}}$); matéria orgânica dissolvida (f_{MOD}); sedimentos em suspensão (f_{SS}); e fitoplâncton ($f_{\text{fitoplâncton}}$).

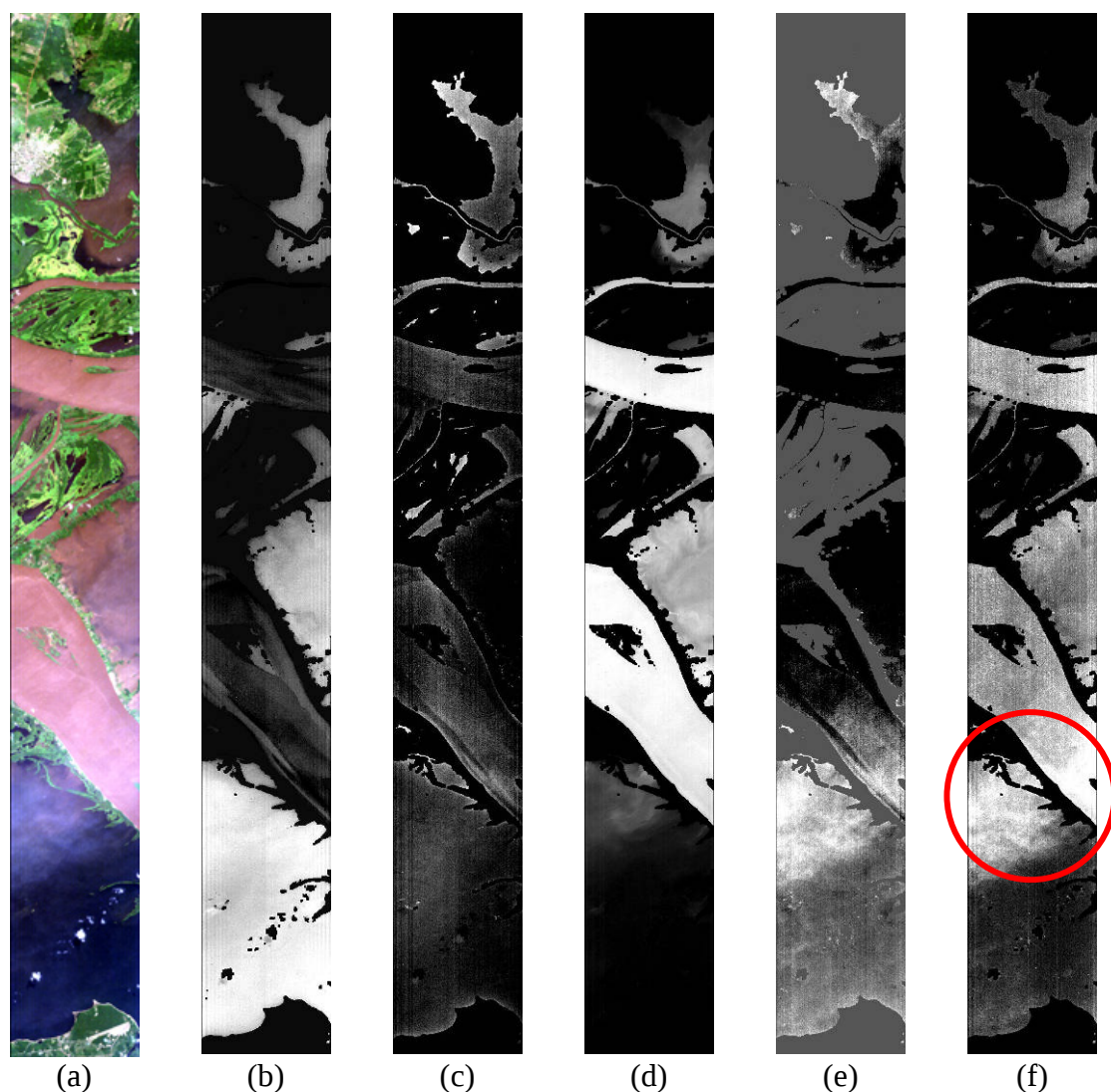


Figura 4.10 - (a) Imagem Hyperion/EO-1 adquirida no período de cheia (23/06/2005), em composição colorida normal: 640,5 nm (vermelho); 548,9 nm (verde); 457,3 nm (azul). Imagens resultantes da aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral, representando as abundâncias fracionais: (b) $f_{\text{água clara}}$; (c) f_{MOD} ; (d) f_{SS} ; e (e) $f_{\text{fitoplâncton}}$. Pixels mais claros representam maiores abundâncias. A imagem de erro RMS do ajuste do modelo é mostrada em (f). O círculo vermelho mostra que o erro do mapeamento aumentou sobre áreas afetadas por brumas.

O algoritmo do MLME aplicado à faixa espectral de 457,34 nm a 884,70 nm foi relativamente capaz de separar as misturas espectrais em praticamente toda a cena. Porém, algumas estimativas de abundâncias fracionais foram negativas ou acima do valor 1. Isto se deriva da suposição do modelo de que a soma das frações deve ser igual a um, sendo que, se uma fração é superestimada, então, uma outra fração é subestimada

para compensar. Observa-se pela Tabela 4.1 que as médias de abundância das quatro frações para toda cena somam para um valor próximo a 1.

Tabela 4.1 - Estatísticas descritivas sobre os resultados de abundâncias fracionais para a imagem Hyperion da cheia.

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
$f_{\text{água clara}}$	-1,71*	1,72*	0,59	0,39
f_{MOD}	-2,96*	2,91*	0,14	0,19
f_{ss}	-0,27	0,87	0,33	0,28
$f_{\text{fitoplâncton}}$	-0,26	0,82	-0,03	0,08
RMS	0,00	963,31	21,73	8,51

* estes valores são muito distantes do intervalo 0-1 e podem ter sido causados por presença de ruídos nos pixels

O baixo sinal de reflectância verificado para os “MRs bases” (ver Figura 4.9) tornou difícil o mapeamento dos mesmos por diversos fatores. A faixa do azul é a mais afetada pela atmosfera e ao mesmo tempo é a faixa onde ocorre a feição de espalhamento pelas moléculas de água pura na água clara e absorção pela matéria orgânica dissolvida. O sinal produzido pela radiação refletida pelo volume de água (Kirk, 1994) é muito pequeno quando comparado à radiação espalhada pela atmosfera, e qualquer diferença na remoção de efeitos atmosféricos pode afetar as medidas de reflectância da água. A baixa relação sinal/ruído (SNR) do sensor Hyperion é um outro fator limitante. Por razões similares, Costa (com. pess.) também encontrou dificuldades no uso de dados Hyperion para mapear a qualidade de águas costeiras no Canadá.

Sobre a água do rio Tapajós, o MLME foi coerente ao mapear $f_{\text{água clara}}$ próximo a 1, e as abundâncias fracionais dos MRs dos demais COAs (f_{MOD} ; f_{ss} ; e $f_{\text{fitoplâncton}}$) próximas a 0. Porém, o mapeamento foi incoerente ao determinar $f_{\text{água clara}}$ sobre os lagos da planície de inundação do rio Amazonas (Figura 4.10(b)), onde durante a cheia ocorre mistura de água do fundo do lago com matéria orgânica dissolvida e água do rio Amazonas com sedimentos em suspensão. Conforme as suposições do MLME a elevada $f_{\text{água clara}}$ mapeada sobre estes corpos d’água provocou a redução de f_{MOD} . Portanto as

abundâncias fracionais mapeadas para os dois “MRs bases” (Figuras 4.10(b) e 4.10(c)) devem ser interpretadas com extremo cuidado.

Coeficientes de correlação linear de *Pearson* (r) e regressões estatísticas foram determinados entre as variáveis de medidas das concentrações de COAs e as abundâncias fracionais mapeadas nos pixels correspondentes às coordenadas geográficas das estações de coleta amostradas em campo. Isto permitiu uma melhor interpretação dos resultados para caracterizar a composição das massas de água e explicar a variação espacial dos COAs. A Figura 4.11 apresenta um correlograma para expressar as relações entre as abundâncias fracionais dos MRs e medidas de profundidade *Secchi*, turbidez e concentrações de COAs.

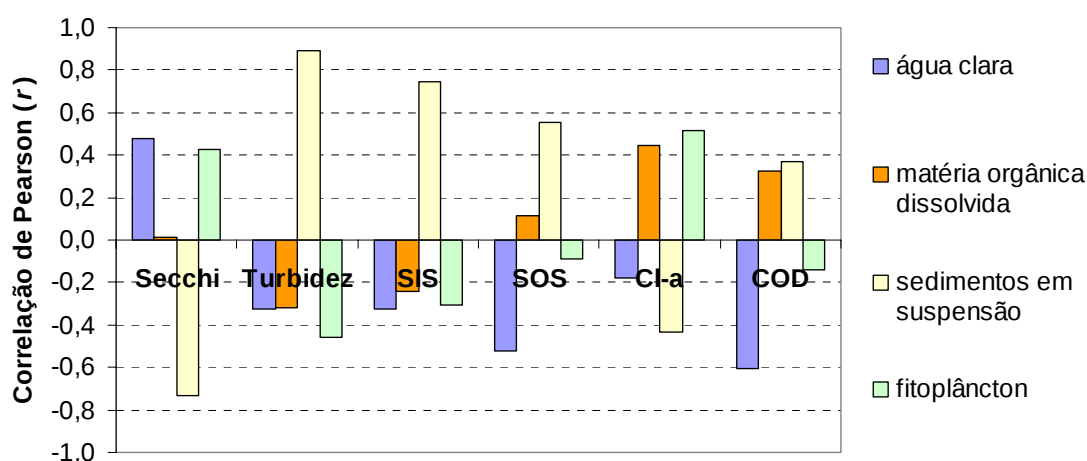


Figura 4.11 - Correlogramas entre as abundâncias fracionais dos Membros de Referência e medidas de transparência da água (profundidade *Secchi* e turbidez) e de concentrações de Constituintes Opticamente Ativos.

É verificada uma variação oposta entre o espectro de reflectância do MR de água clara – maior espalhamento no azul – e do MR de matéria orgânica dissolvida – maior espalhamento no vermelho e infravermelho (Figura 4.9). De fato, o mapeamento de $f_{\text{água clara}}$ e f_{MOD} (Figura 4.10) apresentou variações opostas na distribuição espacial. A correlação negativa de $f_{\text{água clara}}$ com a turbidez ($r = -0,33$; $p\text{-valor} = 0,030$) e positiva com a profundidade *Secchi* ($r = 0,48$; $p\text{-valor} = 0,001$) evidenciam a disponibilidade de luz na coluna d’água, ou seja, uma zona eufótica mais profunda. A água preta também apresenta baixa turbidez ($r = 0,32$; $p\text{-valor} = 0,035$), mas ao mesmo tempo as

substâncias orgânicas dissolvidas são absorvedoras limitando a penetração da luz. Isto explica a inexistência de correlação entre a matéria orgânica dissolvida e a profundidade *Secchi* (Figura 4.11).

A Figura 4.12 mostra que a concentração de carbono orgânico dissolvido (COD) não varia significativamente entre as águas brancas do rio Amazonas e as águas pretas dos lagos da planície. O aumento da concentração de sedimentos em suspensão causa um efeito de redução de f_{MOD} sem que haja uma variação efetiva na concentração deste COA na água. Isso impede que a matéria orgânica dissolvida seja quantificada por meio do resultado do mapeamento espectral. As águas claras do rio Tapajós se destacam por apresentar concentrações baixas de COD e foram mapeadas corretamente com valores de f_{MOD} próximos a 0.

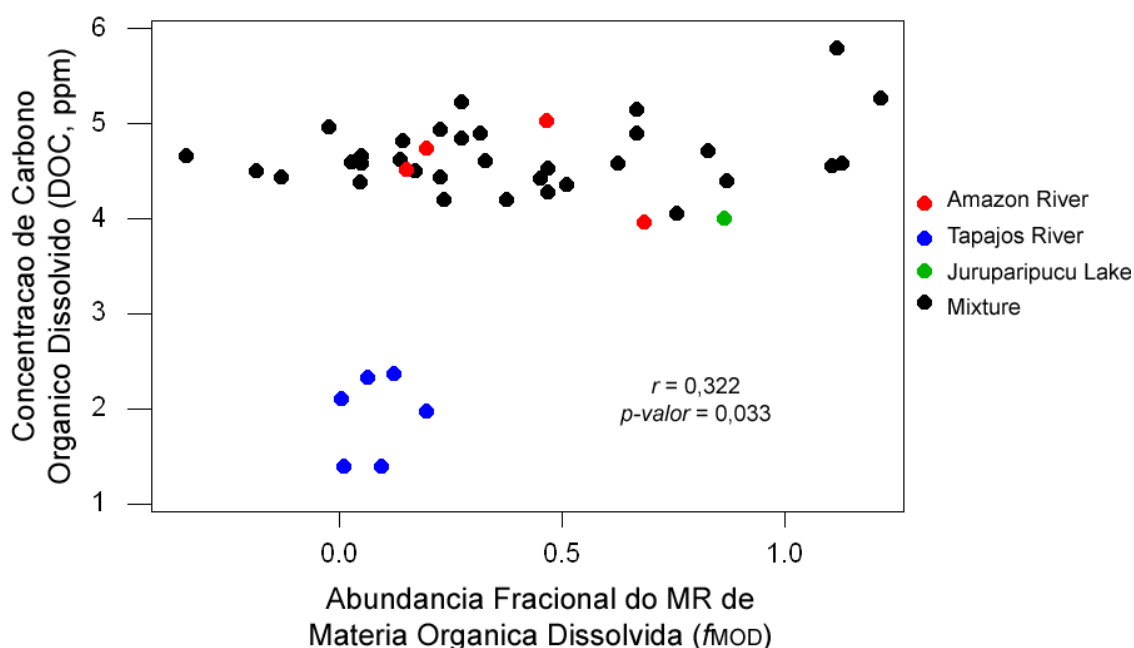


Figura 4.12 - Relação entre COD, indicador da matéria orgânica dissolvida, e os valores de abundância fracional do Membro de Referência de matéria orgânica dissolvida.

Os efeitos espectrais do fitoplâncton são pouco expressivos na cena do período de cheia. Isto resultou em valores reduzidos de $f_{fitoplâncton}$ (ver Tabela 4.1). Mesmo assim, o mapeamento de $f_{fitoplâncton}$ apresentou relação positiva com a concentração de *Chl-a* ($r = 0,515$; $p\text{-valor} = 0,000$). As águas claras do rio Tapajós e águas pretas de lagos

pequenos, ambas com baixa concentração de Cl-*a*, foram mapeadas com valores de $f_{\text{fitoplâncton}}$ em torno de 0 (Figura 4.13). Aparentemente o MLME teve sucesso ao mapear o fitoplâncton em águas com baixa turbidez. Os pontos vermelhos, na Figura 4.13, indicam que os sedimentos em suspensão do rio Amazonas foram responsáveis pela reprodução de valores negativos de $f_{\text{fitoplâncton}}$. Observa-se que a presença de brumas (notada na imagem Hyperio/EO-1 em composição colorida normal; ver Figura 4.10(a)) induziu o aumento de $f_{\text{fitoplâncton}}$ mapeada, principalmente, sobre a região norte do rio Tapajós e sul do rio Amazonas (Figura 4.10(e)). Isto também é evidenciado pelo círculo vermelho destacado na imagem de erro RMS na Figura 4.10(f).

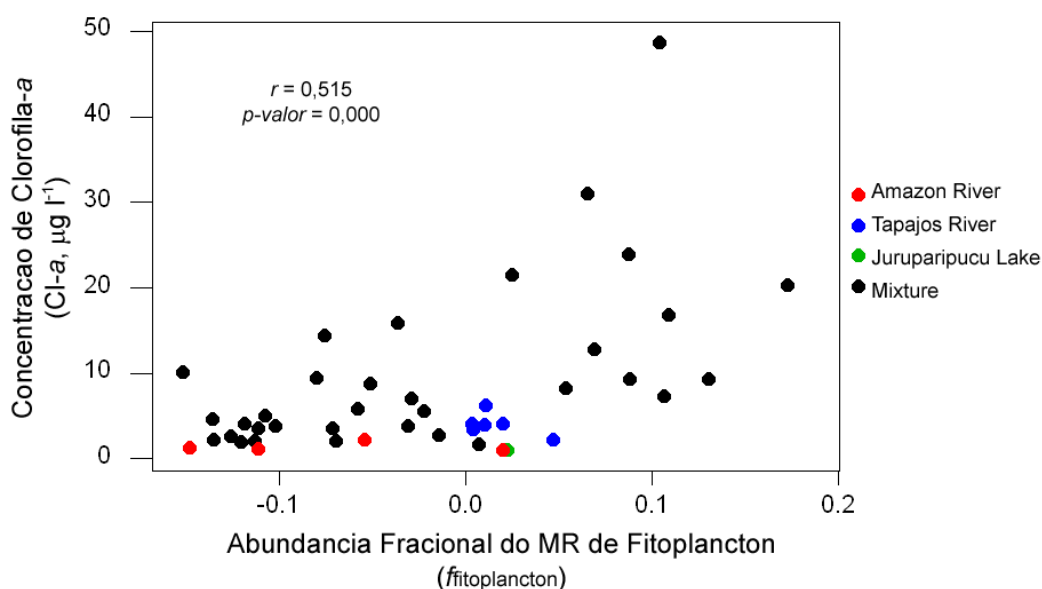


Figura 4.13 - Relações entre o conteúdo de clorofila-*a* e os valores de abundância fracional do Membro de Referência fitoplâncton.

A região de $f_{\text{fitoplâncton}}$ positiva ao norte da cena da imagem Hyperion foi mapeada também como matéria orgânica dissolvida (ver Seção 4.2.5). De fato, a correlação de f_{MOD} com Cl-*a* foi positiva ($r = 0,45$; $p\text{-valor} = 0,002$; ver Figura 4.11). Entretanto, é preciso mencionar que a concentração de Cl-*a* foi reduzida em águas pretas de lagos menores e mais isolados (p.ex., Lago Juruparipucu; ver Seção 4.2.7). Casos como estes foram menos amostrados devido à dificuldade de acesso no campo e menor proporção em relação às outras massas de água da cena.

O mapeamento de f_{SS} apresentou alta correlação com a concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão (SIS) medida em campo ($r = 0,75$; $p\text{-valor} = 0,000$). A forte correlação positiva com a medida de turbidez e negativa com a profundidade *Secchi* evidenciam uma zona eufótica reduzida na presença de sedimentos em suspensão. A baixa transparência dessas águas pode ser um dos fatores que explica a correlação inversa observada com a medida de concentração de Cl-*a* ($r = -0,45$).

Quando água com sedimentos em suspensão se mistura com as outras massas de água, o incremento de SIS causa um efeito não-linear sobre a mistura espectral. Assim, os valores de f_{SS} obtidas pelo MLME não são diretamente proporcionais à concentração real de SIS medida em mg l^{-1} . Pixels estimados com f_{SS} negativa coincidem com locais de estações de coleta que apresentaram as maiores concentrações de Cl-*a*. A água clara e matéria orgânica dissolvida com baixa turbidez foram ambas mapeadas corretamente apresentando f_{SS} próximo a 0 (Figura 4.14). A relação apresentada na Figura 4.14 indica que no intervalo de variação de f_{SS} a partir de 0 até 0,5 o aumento na concentração de SIS é praticamente linear e inferior a 15 mg l^{-1} . Para valores de f_{SS} maiores que 0,5 o aumento de concentração de SIS é intenso e ocorre de forma exponencial.

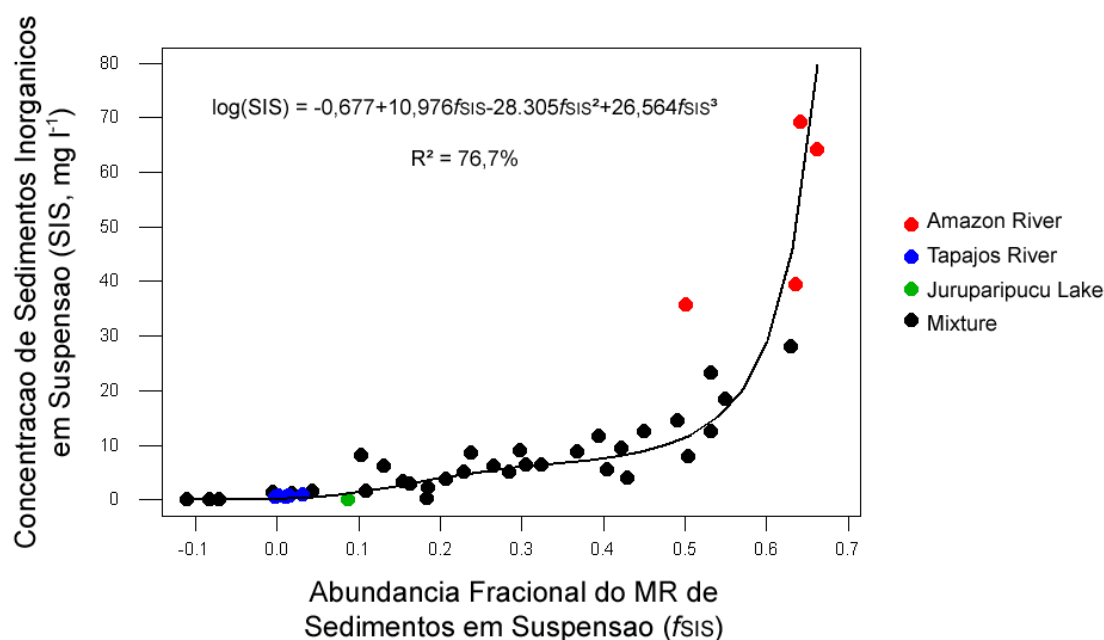


Figura 4.14 - Relações entre o conteúdo de sedimentos inorgânicos em suspensão (SIS) e os valores de abundância fracional do Membro de Referência sedimentos em suspensão.

A imagem de erro RMS demonstrou valores mais elevados nas regiões afetadas por brumas e uma certa relação perceptível com a f_{SS} (Figura 4.10). De fato a reflectância dos sedimentos em suspensão na água é dominante sobre todos os COAs. Portanto, o sedimento é o principal causador de incertezas sobre o mapeamento das abundâncias fracionais dos demais MRs ($f_{\text{água clara}}$, f_{MOD} ; $f_{\text{fitoplâncton}}$).

Outros parâmetros não ópticos de medidas também foram úteis para caracterizar as massas de água em função das propriedades físico-químicas e apresentaram relações significativas com as abundâncias mapeadas. A Figura 4.15 mostra a característica contrastante de haver alta correlação positiva da concentração de carbono inorgânico e orgânico dissolvidos com f_{SS} e baixa com $f_{\text{água clara}}$. Outra relação evidente é observada pela correlação positiva de oxigênio dissolvido com $f_{\text{água clara}}$ e contrária com f_{MOD} . Nos lagos de água preta é observado déficit de oxigênio dissolvido e pH mais baixo, de acordo com as características ácidas dessa água com bastante material orgânico em decomposição.

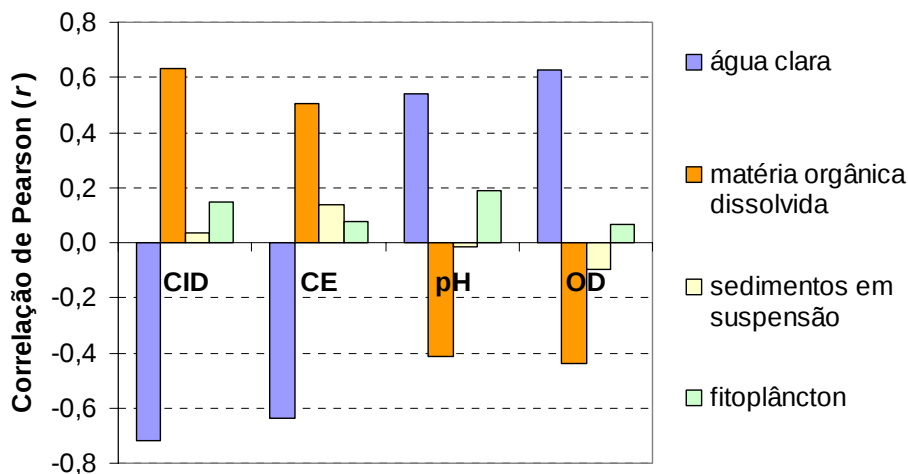


Figura 4.15 - Correlogramas entre as abundâncias fracionais dos Membros de Referência e medidas que expressam parâmetros não ópticos de qualidade da água.

4.1.5 Mapeamento Espectral da Imagem Hyperion/EO-1 do Período de Vazante

A Figura 4.16 representa, em imagens escalonadas em nível de cinza, as abundâncias fracionais de cada MR considerado: água clara ($f_{\text{água clara}}$); matéria orgânica dissolvida (f_{MOD}); sedimentos em suspensão (f_{ss}); e fitoplâncton ($f_{\text{fitoplâncton}}$).

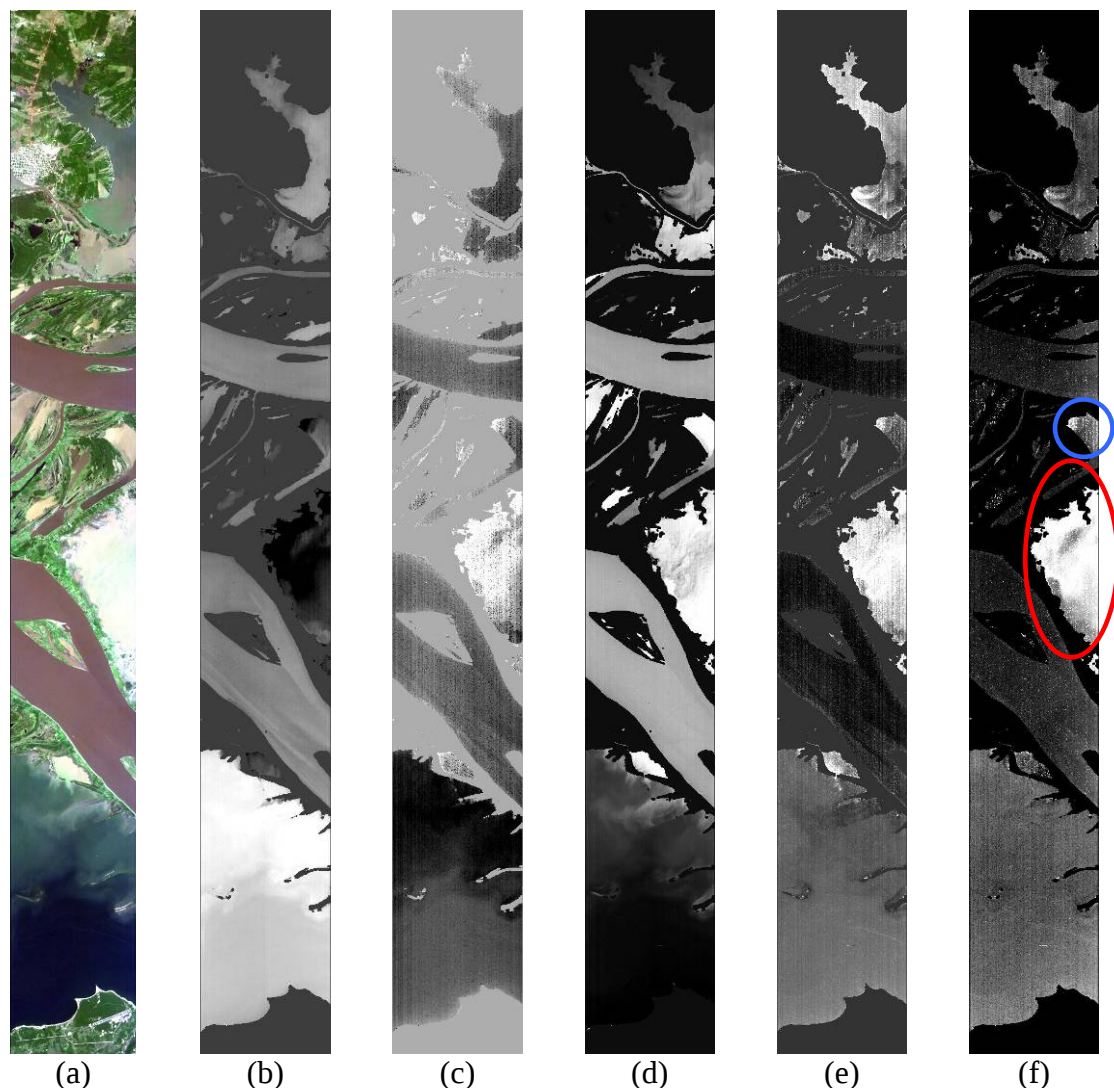


Figura 4.16 - (a) Imagem Hyperion/EO-1 adquirida no período de vazante (16/09/2001), em composição colorida normal: 640,5 nm (vermelho); 548,9 nm (verde); 457,3 nm (azul). Imagens resultantes da aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral, representando as abundâncias fracionais: (b) $f_{\text{água clara}}$; (c) f_{MOD} ; (d) f_{ss} ; e (e) $f_{\text{fitoplâncton}}$. Pixels mais claros representam maiores abundâncias. A imagem de erro RMS do ajuste do modelo é mostrada em (f).

Assim como no mapeamento da imagem Hyperion da cheia, a abundância fracional de cada MR não atendeu totalmente às suposições do modelo (Tabela 4.2): as abundancias mapeadas devem resultar em valores entre 0 e 1; e em cada pixel as frações devem somar para a unidade.

Tabela 4.2 - Estatísticas descritivas sobre os resultados de abundâncias fracionais para a imagem Hyperion da vazante.

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
$f_{\text{água clara}}$	-3,21*	7,53*	1,30	0,89
f_{MOD}	-1,87*	3,55*	-0,56	0,48
f_{ss}	-0,48	1,13	0,36	0,30
$f_{\text{fitoplâncton}}$	-0,16	1,39	0,08	0,12
RMS	8,15	1080,94	26,29	8,97

* estes valores são muito distantes do intervalo 0-1 e podem ter sido causados por presença de ruídos nos pixels

Não houve dados de campo disponíveis para comprovar os resultados obtidos para o período de vazante. Por meio de interpretação visual observou-se que o MLME se comportou de forma similar ao mapeamento anterior, sendo de forma geral afetado pelos mesmos efeitos espectrais. Em relação ao mapeamento da imagem da cheia, a imagem de $f_{\text{fitoplâncton}}$ apresentou um valor médio mais elevado na vazante (Tabela 4.2) e demonstrou boa coerência de distribuição espacial (Figura 4.16(e)). A imagem de erro RMS apresentada na Figura 4.16(f) indicou que a maior parte dos erros de mapeamento se concentrou onde espectralmente ocorre a mistura entre sedimentos em suspensão e fitoplâncton (p.ex., o lago Aramanaí destacado pela elipse vermelha na imagem de erro RMS), e em lagos de águas rasas com elevadíssimas concentrações de sedimentos em suspensão (p.ex., o lago Furo do Aritapera destacado pelo círculo azul na imagem de erro RMS).

4.2 Dinâmica Temporal entre os Períodos de Cheia e Vazante

O balanço de nutrientes nos lagos da várzea varia consideravelmente com as diferenças anuais na amplitude da inundação. Uma mudança na intensidade do pulso de inundação altera a proporção entre a Zona de Transição Aquática-Terrestre (ZTAT) e a Área de Contribuição do Lago (ACL) e, conseqüentemente, modifica a disponibilidade de nutrientes nos lagos (Junk, 1997). Tendo esta consciência, a análise temporal realizada não pretendeu quantificar as relações evolutivas no sistema rio-planície ao longo do pulso de inundação. No entanto, embora as cenas Hyperion disponíveis sejam de anos diferentes, cada uma representa tipicamente um período distinto do pulso de inundação. Assim, com o objetivo de evidenciar as principais mudanças sazonais na composição da água, f_{ss} e $f_{fitoplâncton}$ foram analisadas comparativamente, a partir dos mapeamentos realizados para as duas imagens (Seção 4.1.4 e Seção 4.1.5). Sete estações de coleta (EC) visitadas em campo foram escolhidas para esta análise, visando representar corpos d'água com diferentes dinâmicas de circulação e composição de água: rio Tapajós (EC-43); rio Amazonas (EC-30); lago Aramanaí (EC-25); lago Furo do Aritapera (EC-20); norte do lago Curumu (EC-01); sul do lago Curumu (EC-01); e lago Juruparipucu (EC-10). Os dados limnológicos obtidos nestes locais são apresentados na Tabela 4.3.

As abundâncias fracionais médias dos MRs foram extraídas das imagens resultantes do MLME, sobre uma área de 9×9 pixels entorno da posição de cada estação de coleta, e comparadas entre os dois períodos de aquisição dos dados. Conforme foi observado pela análise de correlação dos dados da imagem do período de cheia com os dados limnológicos de campo, é preciso ter em vista que as variações de abundâncias fracionais mapeadas pelo MLME não são diretamente proporcionais as variações de concentrações dos COAs. Portanto, para tornar viável uma análise quantitativa mais absoluta no período de vazante teria sido necessário o estabelecimento das relações das abundâncias fracionais dos MRs com dados de verdade de campo também naquele período.

Tabela 4.3 - Parâmetros da água medidos em campo no período de cheia nas regiões escolhidas para análise temporal.

Local	rio Tapajós	rio Amazonas	lago Arama-naí	lago Furo do Aritapera	lago Curumu (sul)	lago Curumu (norte)	lago Jurupari-pucu
Estação de coleta	EC-43	EC-30	EC-25	EC-20	EC-07	EC-01	EC-10
Prof. Secchi (m)	2,90	0,30	0,80	0,45	0,65	1,10	1,30
Turbidez (NTU)	2,40	66,10	16,87	29,60	17,30	5,97	8,27
SIS (mg l⁻¹)	0,35	64,33	3,96	12,36	6,29	0,00	0,00
SOS (mg l⁻¹)	1,40	9,47	2,64	5,79	4,04	6,18	2,75
Cl-a (µg l⁻¹)	3,36	2,08	3,96	1,84	4,97	48,78	0,87
COD (ppm)	2,10	5,24	4,44	4,44	4,85	5,27	4,00
CID (ppm)	1,46	3,87	3,76	4,14	3,21	5,97	4,29
OD (mg l⁻¹)	6,27	2,96	4,87	2,91	6,93	5,16	0,56
CE (µS cm⁻¹)	18,20	51,40	50,80	51,90	44,90	75,60	47,80
pH	6,78	6,39	6,57	6,28	6,20	6,66	6,30
Prof. (m)	17,00	23,50	4,50	2,80	4,90	4,20	2,50

4.2.1 Rio Tapajós

O rio Tapajós é um grande tributário do rio Amazonas com baixas concentrações de sedimentos em suspensão e sólidos dissolvidos (Tabela 4.3). A zona eufótica na água clara do rio Tapajós é profunda, mas essas águas são mais pobres em nutrientes quando comparadas às do Amazonas. A Figura 4.17 apresenta a localização da estação de coleta EC-43 e mostra que houve pouca variação na cor da água do rio Tapajós entre o período de cheia e da vazante.

Para o período de cheia o MLME foi correto ao mapear valores de $f_{\text{água clara}}$ próximos a 1 e de abundâncias fracionais para os demais MRs (f_{MOD} ; f_{SS} ; e $f_{\text{fitoplâncton}}$) próximos a 0.

Deve ser lembrado que COAs em baixas concentrações fazem parte do MR de água clara.

Aparentemente, a produção de fitoplâncton no rio Tapajós aumenta na vazante, conforme pode ser observada pelos espectros de reflectância e pelos valores de abundâncias fracionais na Figura 4.18.

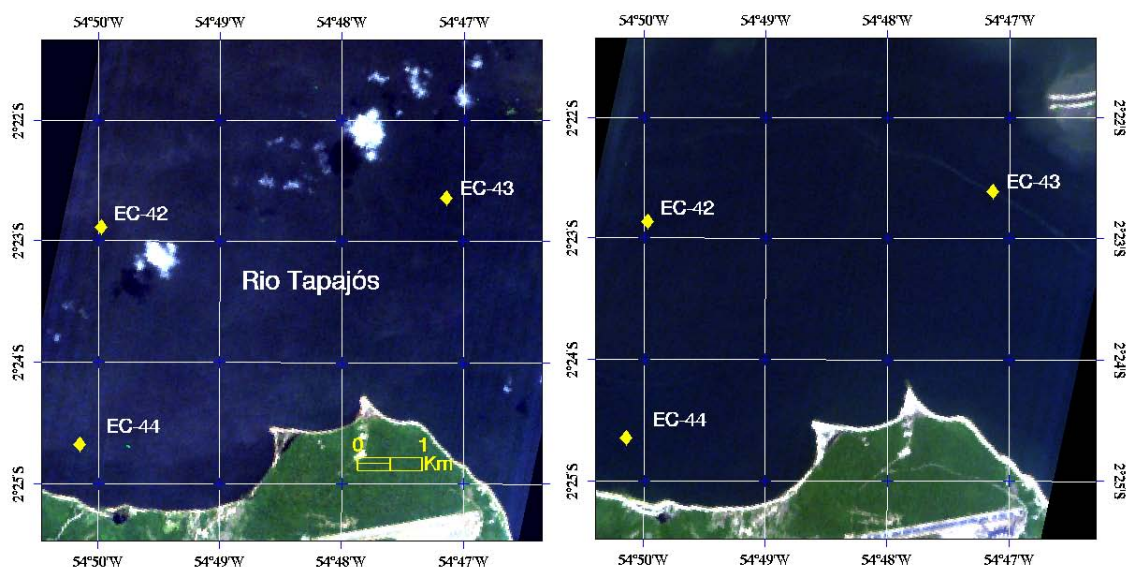


Figura 4.17 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante sobre o rio Tapajós, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-43 está indicada na figura.

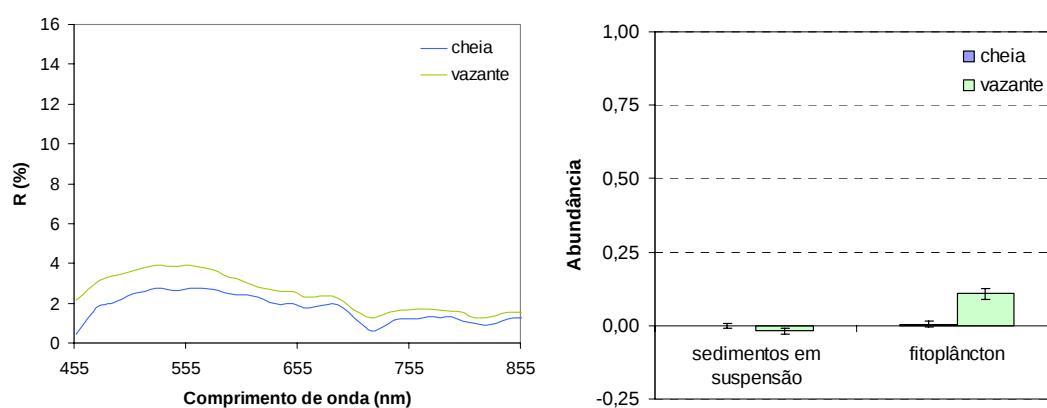


Figura 4.18 - Variação temporal de reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-43 no rio Tapajós.

4.2.2 Rio Amazonas

O Amazonas é o rio principal da planície de inundação. Durante o seu percurso dos Andes até o oceano, o conteúdo de sólidos dissolvidos no rio Amazonas decai significativamente devido à mistura das massas de água dos seus tributários, que geralmente são mais pobres em sólidos dissolvidos (Junk, 1997). Mesmo assim altas concentrações de sólidos dissolvidos ocorrem nas águas do rio Amazonas que cruzam a Planície de Inundação Alenquér-Santarém (PIAS). Tal observação é sustentada pela condutividade elétrica (CE) medida na estação de coleta EC-30 ($51,40 \mu\text{S cm}^{-1}$), apresentada na Tabela 4.3. A concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão (SIS) no rio também se mostrou tipicamente elevada ($64,33 \text{ mg l}^{-1}$).

A Figura 4.19 apresenta a localização da estação de coleta EC-30 e mostra a variação na cor da água do rio Amazonas entre as imagens adquiridas nos períodos da cheia e da vazante. A reflectância da água branca do rio Amazonas é sempre dominada pelos sedimentos em suspensão, principalmente pela fração inorgânica. O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) foi eficiente ao mapear, em ambos os períodos, f_{ss} acima de 0,5 e $f_{\text{fitoplâncton}}$ próxima a 0 (Figura 4.20). Segundo Junk (1997), a água branca apresenta limitação de nitrogênio para o crescimento de fitoplâncton, além da baixa disponibilidade de luz em decorrência da turbidez causada pelas partículas inorgânicas em suspensão.

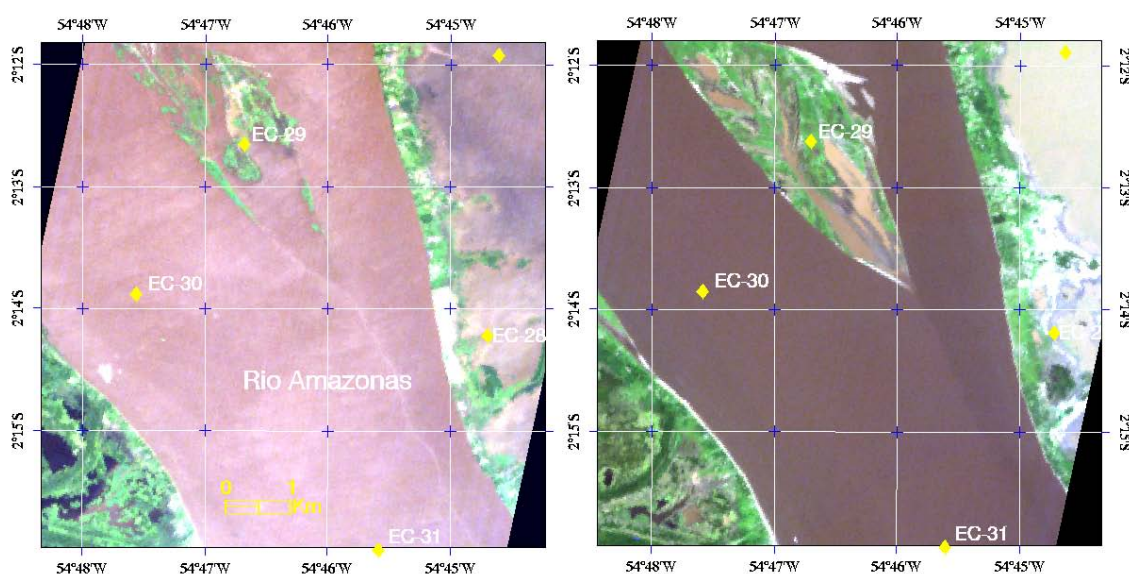


Figura 4.19 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre o rio Amazonas, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-30 está indicada na figura.

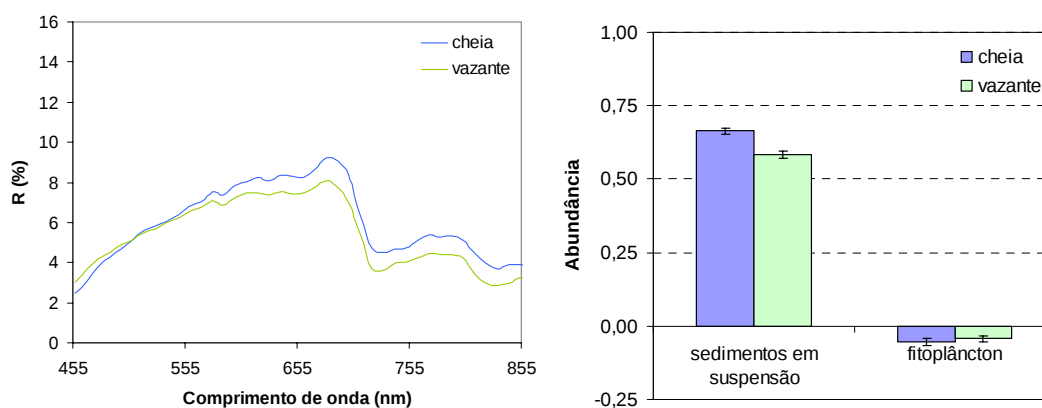


Figura 4.20 - Variação temporal de reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-30 no rio Amazonas.

A concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão (SIS) no rio Amazonas durante o período de vazante é em torno de 20 mg l^{-1} (Barbosa, 2005)¹. No período de cheia foi observado $64,33 \text{ mg l}^{-1}$ de SIS na estação EC-30 (Tabela 4.3). Admitindo-se que os dados de Barbosa (2005) correspondem às concentrações médias de vazante é

¹ Este valor foi verificado por Barbosa (2005) por amostras de água do rio Amazonas coletadas próximo ao Lago Grande de Curuai, durante o período da vazante.

possível supor que há uma diferença aproximada da ordem de 40 mg l^{-1} de SIS entre estes dois períodos. Essa diferença na concentração de SIS deveria implicar em maior reflectância da água do rio Amazonas na imagem do período de cheia em relação à imagem do período de vazante, ao longo de toda faixa a espectral (Curran e Novo, 1988; Novo et al., 1991).

De fato, a EC-30 apresentou maiores valores de reflectância em praticamente todo o espectro na imagem do período de cheia, exceto nos comprimentos de onda menores que 510 nm. Essas diferenças entre os valores experimentais e os valores *in situ* podem ser relacionados à presença de sedimentos orgânicos em suspensão (SOS) e matéria orgânica dissolvida adsorvida às partículas em suspensão. Isto provocaria na cheia uma maior absorção na região do azul, absorção essa decrescente em relação aos comprimentos de onda mais longos (Dekker, 1993; Kirk, 1994).

Isto se refletiu em maior f_{ss} mapeada pelo MLME para o período de cheia. A concentração de SIS na cheia é mais que o dobro em relação a vazante, mas a f_{ss} observadas entre a cheia (0,66) e vazante (0,58) não demonstram essa mesma proporção de forma direta. Isto é explicado pela a variação das frações inorgânica e orgânica na composição dos sedimentos em suspensão, observada entre estes dois períodos (Barbosa, 2005), e ao efeito não-linear, apontado anteriormente na Seção 4.1.4, que existe entre f_{ss} calculada pelo MLME e a concentração real de SIS.

4.2.3 Lago Aramaná

O lago Aramaná é o mais extenso da PIAS e se situa dentro da Ilha Grande do Tapará, que divide o rio Amazonas em dois braços ao sul e ao norte. Este lago se encontra totalmente isolado da terra firme e possui uma extensa ZTAT e pequena ACL relativa. A Figura 4.21 apresenta a localização da estação de coleta EC-25 e mostra a drástica variação na cor da água do lago Aramaná entre os períodos da cheia e da vazante.

Quando as águas do rio Amazonas entram na planície de inundação durante a cheia, os sedimentos se decantam e a turbidez diminui significativamente. A concentração de SIS medida no lago Aramaná na estação de coleta EC-25 foi de $3,96 \text{ mg l}^{-1}$. Os sedimentos

em suspensão do rio se misturam com a água do fundo do lago que contem bastante matéria orgânica dissolvida, em função da decomposição de plantas que se desenvolveram durante a fase terrestre antecedente. Os sedimentos inorgânicos em suspensão causam espalhamento enquanto a matéria orgânica dissolvida causa absorção de radiação na faixa de comprimento de onda do azul. Mesmo assim, f_{ss} foi mapeada com sucesso.

A concentração de clorofila-*a* (Cl-*a*) observada na estação de coleta EC-25 foi relativamente baixa ($3,96 \mu\text{g l}^{-1}$), mas o mapeamento apresentou $f_{\text{fitoplâncton}}$ negativa no período de cheia (-0,12; Figura 4.22). Isto ocorreu, supostamente, pelo fato do comportamento espectral dos sedimentos em suspensão junto com matéria orgânica dissolvida serem dominantes nestas águas e, portanto, as feições espectrais do fitoplâncton foram inibidas.

Conforme postulado por Junk (1997), o tamanho e extensão de alagamento de um lago grande como este exercem influências importantes nas condições hidroquímicas devido à turbulência na coluna d'água induzida pelo vento. Forte turbulência tende a aumentar a concentração de oxigênio por difusão e introduz nutrientes para a zona eufótica por mistura de água do fundo. Ondas fortes também reduzem o crescimento de macrófitas, o que pode favorecer o desenvolvimento de fitoplâncton.

O lago Aramanaí apresenta profundidade em torno de 1,5 m na vazante² e o nível de nutrientes disponíveis na água é elevado. Assim, no período de vazante o fitoplâncton se desenvolve abundantemente, mesmo em condições de zona eufótica limitada por haver grande quantidade de sedimentos em suspensão. Os incrementos em f_{ss} e $f_{\text{fitoplâncton}}$ puderam ser observados na imagem da vazante pelas estimativas do MLME (Figura 4.22).

² Este valor foi estimado a partir da profundidade medida na cheia na estação de coleta EC-25 (Tabela 4.3) e a diferença de nível calculada pelos registros da hidrógrafa (Figura 3.4).

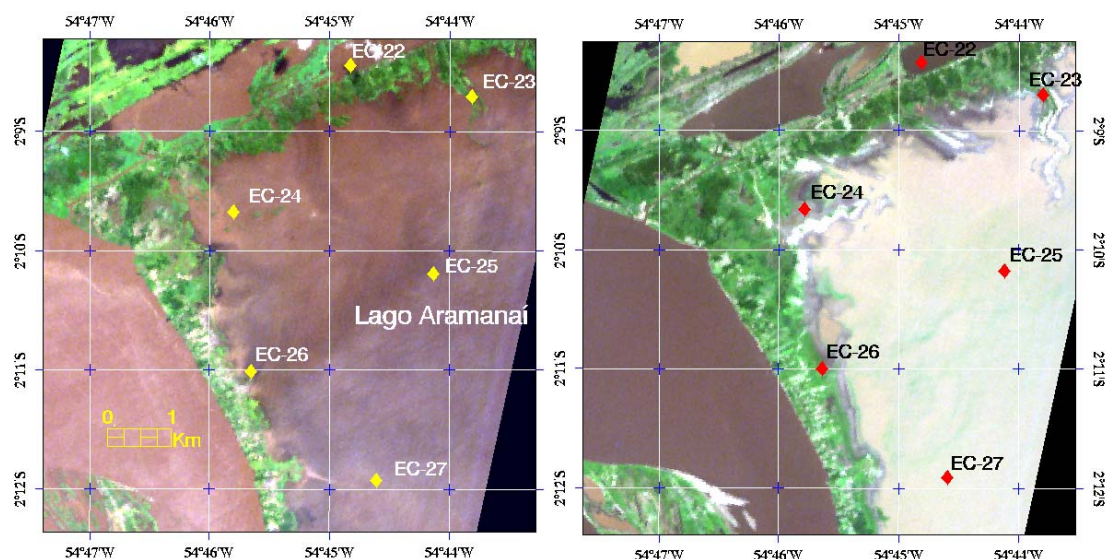


Figura 4.21 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre o lago Aramaná, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-25 está indicada.

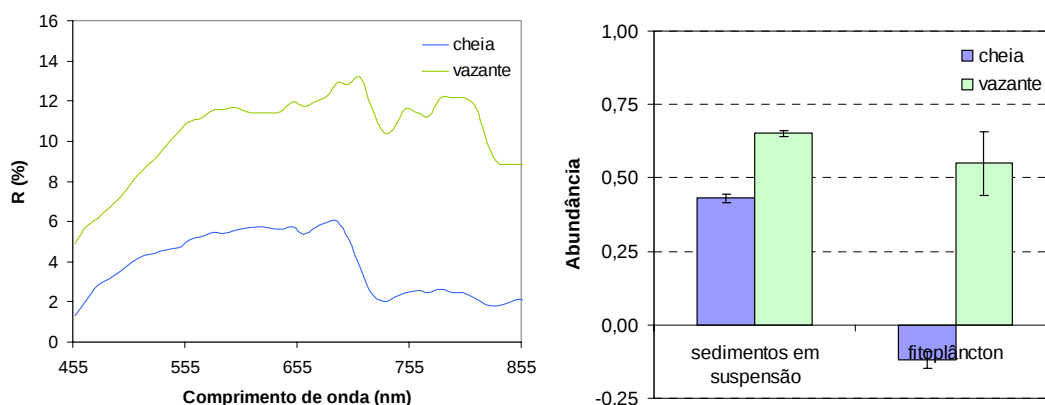


Figura 4.22 - Variação temporal de reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-25 no lago Aramaná.

O espectro de reflectância da imagem do período de vazante apresentada na Figura 4.22 retrata claramente os efeitos de mistura espectral entre sedimentos em suspensão e fitoplâncton. O sedimento produz espalhamento e o fitoplâncton absorção na faixa do vermelho entre 560 nm e 670 nm. Ambos contribuem para produzir espalhamento na faixa do IVP.

4.2.4 Lago Furo do Aritapera

O lago Furo do Aritapera também se situa dentro da Ilha Grande do Tapará, próximo ao braço norte do rio Amazonas. A Figura 4.23 apresenta a localização da estação de coleta EC-20 e mostra a variação na cor da água entre os períodos da cheia e da vazante.

A estação EC-20 apresenta características espectrais e medidas de composição da água semelhantes à estação EC-25. Foi observado um incremento de 0,10 em f_{SS} na estação EC-20 (Figura 4.24), o que corresponde ao aumento de 8,40 mg l⁻¹ de SIS e 3,15 mg l⁻¹ de SOS (Tabela 4.3). O MLME mapeou estas duas estações com $f_{fitoplâncton}$ idênticas, embora a concentração de Cl-a observada na estação EC-20 foi de 2,12 µg l⁻¹ a menos em relação à EC-25.

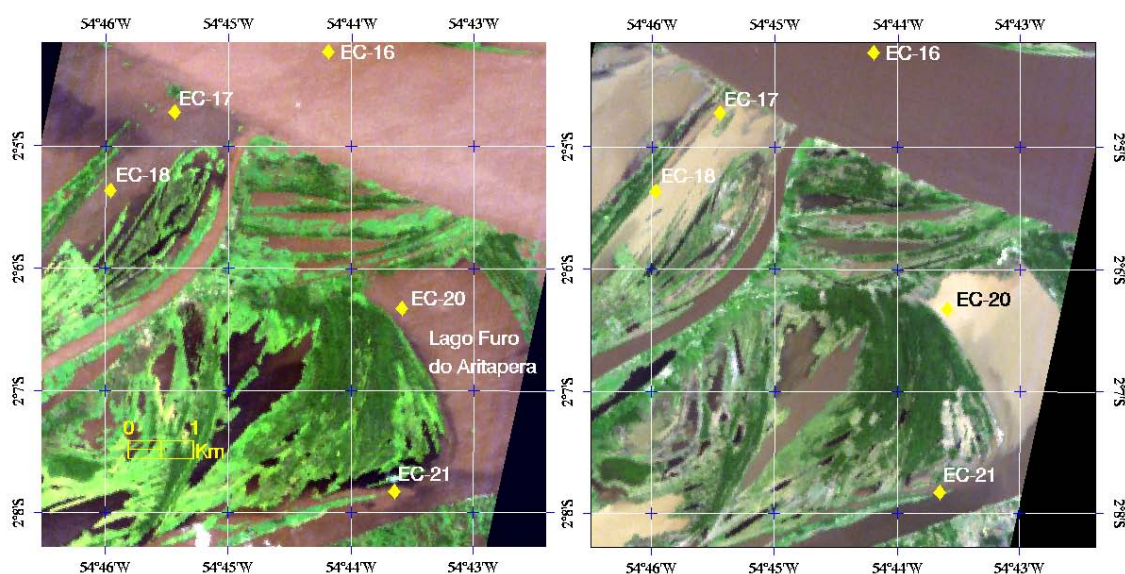


Figura 4.23 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre o lago Furo do Aritapera, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-20 está indicada.

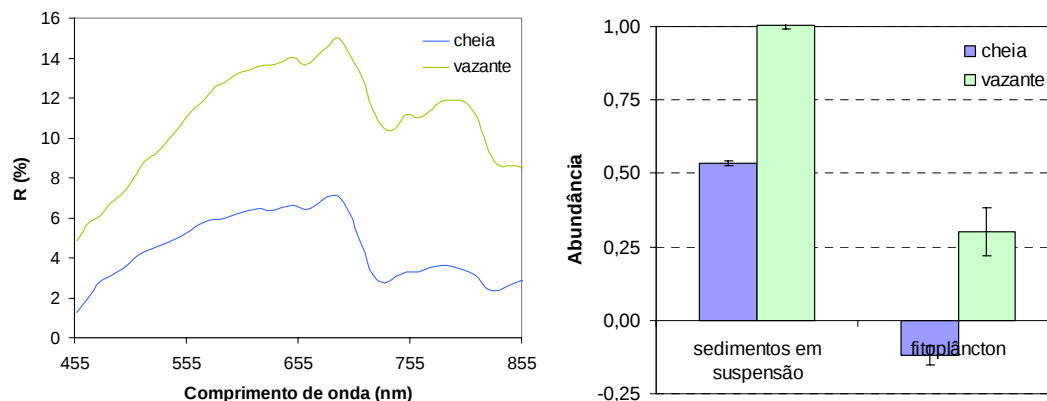


Figura 4.24 - Variação temporal de reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-20 no lago do Furo do Aritapera.

A abundância fracional de sedimentos em suspensão (f_{ss}) de 1,01 mapeada para a estação EC-20 na vazante é coerente, pois esta é uma região típica de elevada concentração de sedimentos em suspensão de acordo com suas propriedades espectrais observadas e características físicas do lago. A Figura 4.25 ilustra a forma como as concentrações de sedimentos em suspensão se tornam elevadas nas águas rasas deste lago durante a vazante. O aumento sucessivo da concentração de sedimentos em suspensão provoca a elevação da reflectância em todo espectro. Entretanto, em certo ponto da transição ao estado de lama ou solo encharcado, o aumento da R_λ deixa de ocorrer tanto na faixa do VIS quanto na do IVP, a partir de 700 nm. Na medida em que isto ocorre é observado que a resposta espectral vai se assemelhando a de um solo.

Este efeito não linear da reflectância dos sedimentos em suspensão em elevadas concentrações na água traz severas complicações para a análise de mistura espectral, pois o espalhamento na faixa do IVP também é uma característica do fitoplâncton. Assim, o aumento de $f_{\text{fitoplâncton}}$ mapeado para este lago na vazante é incerto (Figura 4.24). Conforme foi mencionado na Seção 4.1.5 a imagem de erro RMS na Figura 4.16 apresenta maiores incertezas nas áreas rasas de elevado sedimento neste lago e no lago Aramanaí.

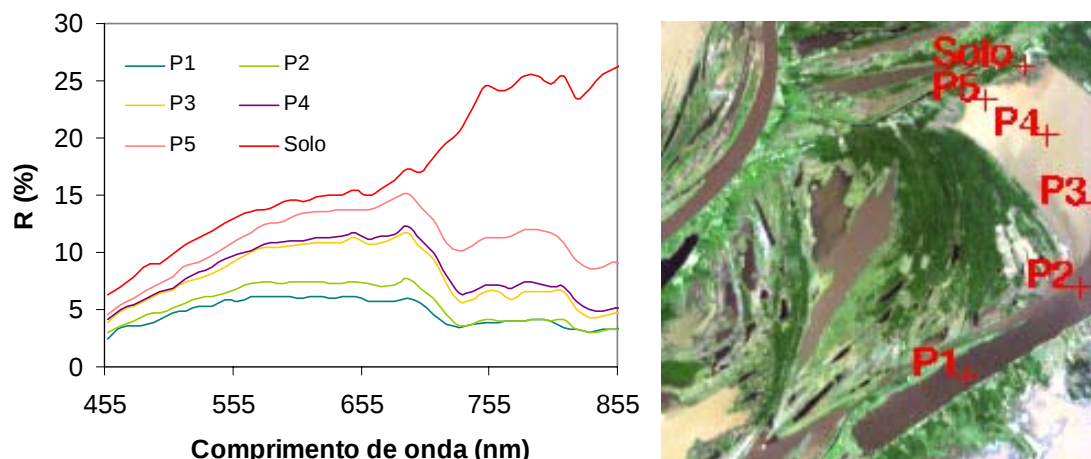


Figura 4.25 - Espectros de transição de água barrenta para solo. Imagem Hyperion da vazante (direita). Os pontos vermelhos se referem à posição do pixel onde o espectro foi amostrado na imagem.

4.2.5 Norte do Lago Curumu

O Lago Curumu é o único da PIAS que faz realmente contato com a terra firme e no seu entorno é observada atividade antrópica. A Figura 4.26 apresenta a localização da estação de coleta EC-01 e mostra a pouca variação na cor da água entre os períodos da cheia e da vazante.

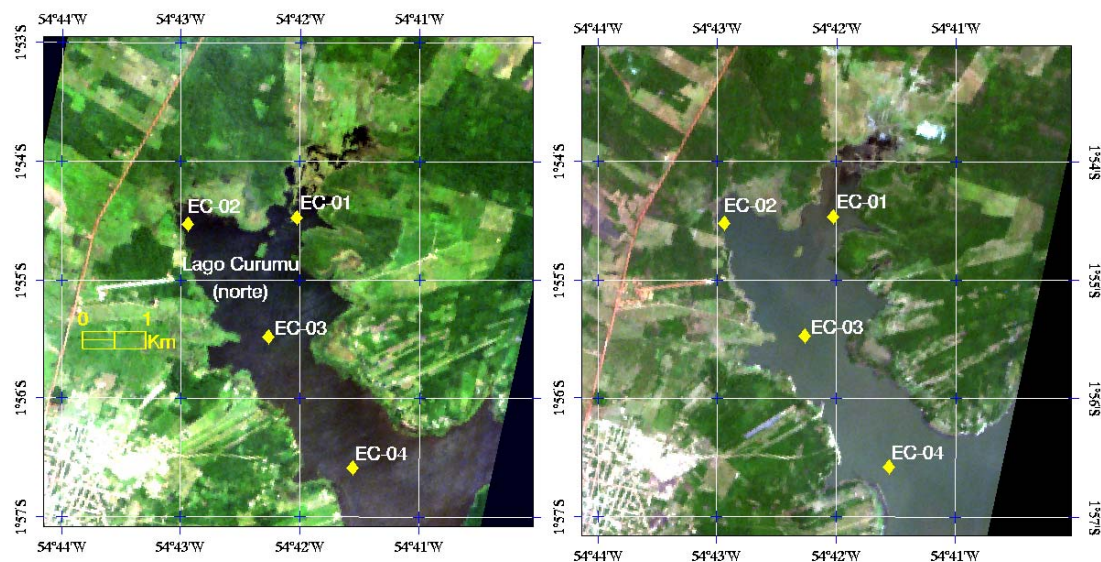


Figura 4.26 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre a região norte do Lago Curumu, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-01 está indicada na figura.

Segundo Junk (1997), com a exposição do fundo do lago no período de água baixa, nutrientes coesos ao sedimento se tornam disponíveis para o crescimento de plantas durante a fase terrestre e são subsequentemente liberados na água quando as plantas se decompõem durante a fase aquática. As águas provindas de terra firme e da chuva são relativamente ricas em nitrogênio. Estas formas de contribuição de nutrientes podem ter sido responsáveis pela produção de fitoplâncton nas águas ao norte do lago Curumu no período de cheia. A estação de coleta EC-01 situou-se próxima da terra firme e apresentou medidas que indicam a maior concentração de sólidos dissolvidos e a maior concentração de Cl-*a* (Tabela 4.3). A região ao norte do lago Curumu foi mapeada com elevada f_{MOD} (Figura 4.10), que ao mesmo tempo apresentou características espectrais que evidenciaram $f_{fitoplâncton}$ de 0,10 (Figura 4.27), que corresponde a 48,8 $\mu\text{g l}^{-1}$ de Cl-*a* *in situ*.

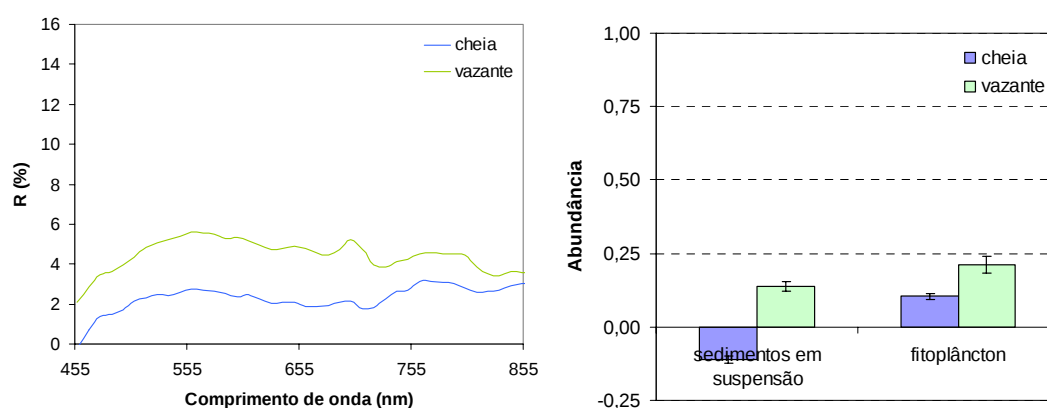


Figura 4.27 - Variação temporal da reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-01 na região norte do lago Curumu.

Na imagem da cheia, o espectro de reflectância extraído da região norte do lago Curumu é bem similar ao MR de matéria orgânica dissolvida podendo ser notado um leve aumento de absorção na faixa do vermelho e de espalhamento na faixa do infravermelho, ambos provocados pela presença de fitoplâncton nestas águas (Figura 4.27). Supostamente, a f_{ss} negativa mapeada para o período de cheia (Figura 4.27) pode ter sido causada pelo efeito espectral conjunto da matéria orgânica dissolvida e fitoplâncton presentes nesta água. Na imagem da vazante, o albedo é maior e as feições

espectrais se misturam entre os COAs presentes: matéria orgânica dissolvida, sedimentos em suspensão e fitoplâncton.

4.2.6 Sul do Lago Curumu

A região sul do lago Curumu também faz contato com terra firme e se situa próxima a igapós. A Figura 4.28 apresenta a localização da estação de coleta EC-07 e mostra a variação na cor da água entre os períodos da cheia e da vazante.

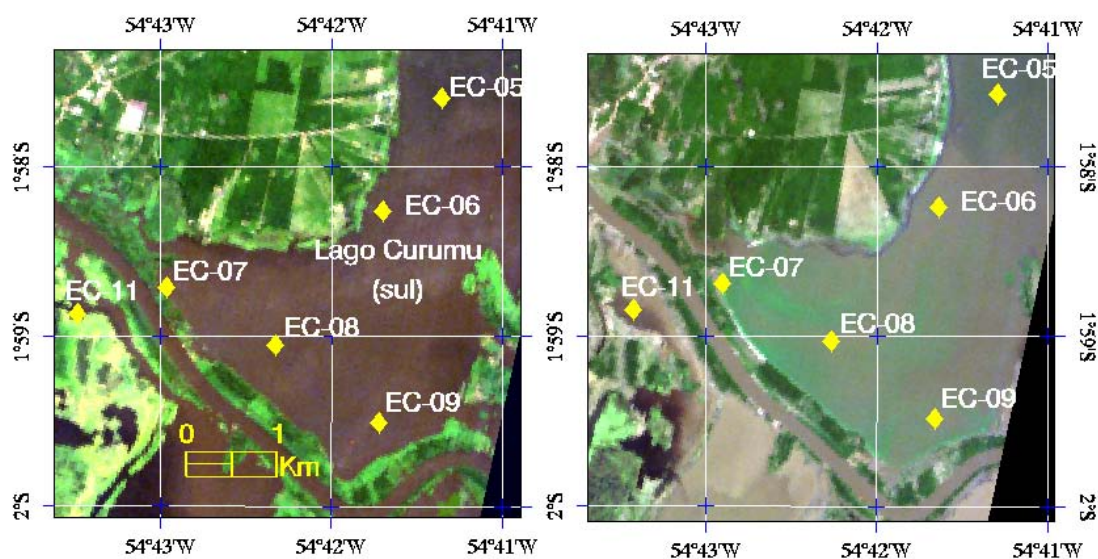


Figura 4.28 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre a região sul do lago Curumu, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-07 está indicada.

Na cheia esta é uma região típica onde água com matéria orgânica dissolvida se mistura com a água com sedimentos em suspensão provinda do rio Amazonas. O MLME indicou 0,31 de f_{SS} para a estação de coleta EC-07 (Figura 4.29).

Foi observada nesta região a ocorrência de florações de fitoplâncton na imagem do período de vazante. A presença de fitoplâncton produz no espectro de reflectância observado na Figura 4.29 efeitos de absorção ao longo da região do VIS que evidenciam um pico de reflectância em 555 nm, e ao mesmo tempo contribui para o aumento do espalhamento no IVP juntamente com as demais partículas refratoras em suspensão

(Kirk, 1994). O efeito de fluorescência devido à Cl-*a* pode ser notado em um pico de reflectância em torno de 685 nm. Um outro pico de reflectância ainda mais forte em torno de 705 nm é causado por fluorescência de Cl-*a* induzida pelo Sol (Gitelson et al., 2000).

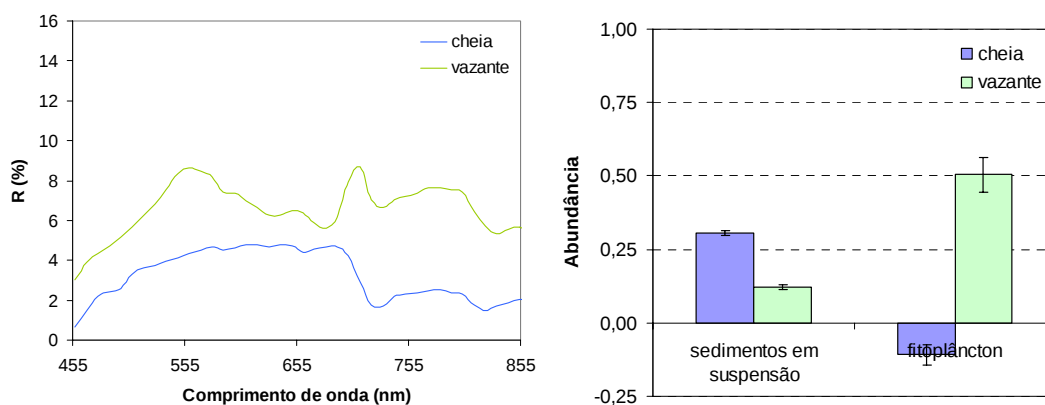


Figura 4.29 - Variação temporal da reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre a estação de coleta EC-07 na região sul do lago Curumu.

A concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão aumenta na vazante em relação ao período de cheia, ao invés de diminuir conforme indicado pelos valores de f_{ss} detectada pelo MLME. Talvez isto seja explicado pelo fato do fitoplâncton ocorrer próximo à superfície da água enquanto o sedimento se distribui melhor na coluna de água.

4.2.7 Lago Juruparipucu

Os lagos típicos de água preta são cercados por igapó e “tapagens” de macrófitas (Figura 4.30). Essas águas são influenciadas hidroquimicamente pela água branca do rio Amazonas. No entanto, a vegetação das margens filtra os sedimentos em suspensão e contribui com matéria orgânica dissolvida. Pelo fato de se preservarem isolados pela vegetação durante todo o ciclo do pulso de inundação a cor de suas águas não se altera (Figura 4.31).

O lago Juruparipucu é de difícil acesso e o lago onde se conseguiu ter acesso para tomar as medidas da estação EC-10 é pequeno. Na imagem Hyperion o pixel correspondente à

estação EC-10 apresentou mistura espectral com vegetação da margem ou de plantas aquáticas. Assumiu-se que as águas desses lagos vizinhos apresentam propriedades semelhantes. Assim, a análise foi realizada considerando que a reflectância média de nove (3×3) pixels posicionados no centro do lago Juruparipucu corresponde às medidas dos parâmetros de qualidade da água da estação EC-10 (Tabela 4.3). A Figura 4.31 apresenta a localização do lago Juruparipucu e da estação de coleta EC-10.



Figura 4.30 - Vegetação no entorno de um lago de água com bastante matéria orgânica dissolvida: igapó (esquerda) e “tapagem” conhecida localmente por arroz selvagem (direita).

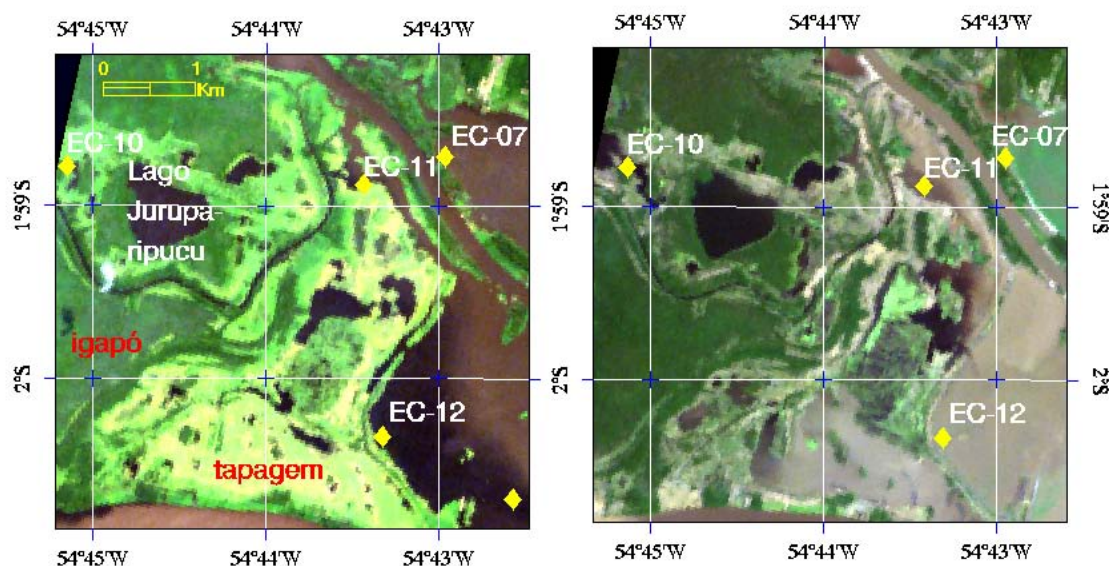


Figura 4.31 - Composição colorida normal do período de cheia (esquerda) e vazante (direita) sobre o lago Juruparipucu, representada pelas bandas Hyperion centradas em 640 nm (vermelho), 549 nm (verde) e 457 nm (azul). A localização da estação de coleta EC-10 está indicada.

O MLME apresentou baixos valores de f_{SS} e $f_{fitoplâncton}$ para os dois períodos (Figura 4.32). Durante o período de cheia a competição pelos nutrientes com as macrófitas limita o desenvolvimento do fitoplâncton. A presença de macrófitas aumenta o seqüestro de nutrientes da água (Junk, 1997). Os nutrientes se tornam mais disponíveis na vazante. Por não ocorrer mudanças significativas na reflectância observada entre os dois períodos, observa-se que a água deste lago permanece com baixa concentração de sedimentos em suspensão e as substâncias húmicas continuam sendo responsáveis pela cor da água (Figura 4.32).

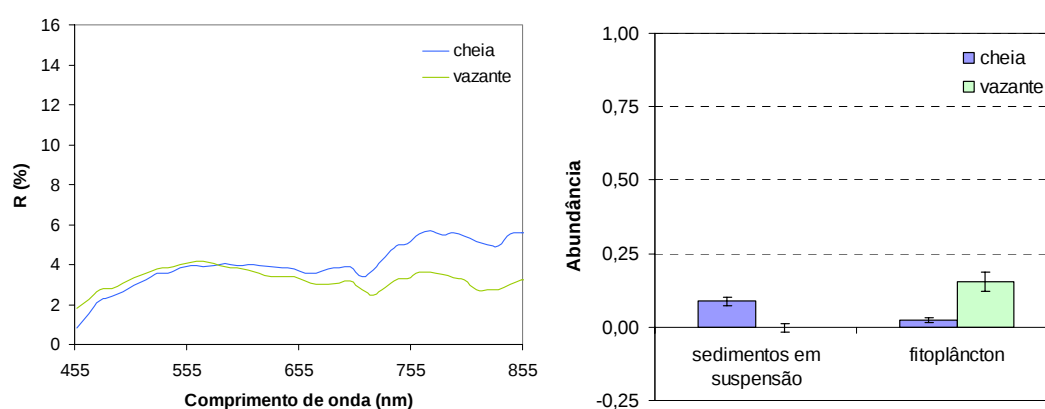


Figura 4.32 - Variação temporal da reflectância e de abundâncias fracionais dos Membros de Referência de sedimentos em suspensão e fitoplâncton sobre o lago Juruparipucu.

Embora a luz que atravessa a coluna de água seja bastante atenuada pela matéria orgânica dissolvida, o fato do lago Juruparipucu apresentar baixa turbidez e pouca profundidade aumenta a chance da reflectância ser afetada pelo substrato orgânico do fundo do lago.

4.3 Análise Espectral da imagem Hyperion/EO-1 Adquirida no Período de Cheia

A Tabela 4.4 apresenta as estatísticas descritivas dos parâmetros de medição de Constituintes Opticamente Ativos (COAs) amostrados em campo.

Tabela 4.4 - Estatísticas descritivas dos parâmetros de medição de Constituintes Opticamente Ativos nas 44 estações de amostragem em campo.

Parâmetros	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
SIS (mg l ⁻¹)	10,13	5,20	15,49	0,00	69,35
SOS (mg l ⁻¹)	4,83	4,76	2,08	1,31	10,55
Cl- <i>a</i> (µg l ⁻¹)	8,13	4,27	9,27	0,87	48,78
COD (ppm)	4,26	4,55	1,01	1,38	5,80
Turbidez (NTU)	19,74	16,65	16,70	2,22	70,90
Secchi* (m)	1,03	0,75	0,77	0,30	3,00

*variável com 43 medidas

4.3.1 Reflectância Espectral

Os espectros de reflectância (R_i) foram medidos ao nível de campo sobre 44 estações de coleta de dados espalhadas pelas águas dos rios e lagos da planície. Os espectros de reflectância medidos nas estações de coleta em campo no período de cheia não foram iguais aos medidos pela imagem Hyperion devido aos erros inerentes aos níveis de aquisição dos dados (Milton, 1987). As medidas de reflectância foi afetada por fatores indesejados que causaram variações de albedo em ambos os casos. A superfície rugosa da água causou maior efeito de reflectância especular sobre os dados adquiridos ao nível de campo. Esta interferência foi notada de forma mais evidente em alguns locais de água amostrada com baixa turbidez. As inclinações das curvas dos espectros na faixa do azul, principalmente entre 455 nm e 500 nm, também foram diferentes entre os dados de campo e Hyperion. A principal fonte de variação no albedo dos espectros Hyperion foi a presença de brumas esparsas sobre a área imageada. No entanto, apesar das

interferências mencionadas, as principais feições espectrais características dos COAs foram similares em ambos os conjuntos de dados (Figura 4.33).

Os correlogramas fornecem um indicativo geral de como as variáveis que representam as concentrações dos COAs se relacionam com a reflectância medida ao nível de campo e orbital (Figura 4.34), sobre a faixa de comprimento de onda entre 455 e 855 nm. Em geral, os coeficientes de correlação de *Pearson* (r) referentes aos principais COAs de interesse se mostraram maiores para os dados Hyperion por praticamente todo o intervalo espectral analisado.

As medidas de profundidade, turbidez e profundidade *Secchi* foram adotadas como variáveis auxiliares às medidas dos COAs. A profundidade não apresentou correlação significativa com a reflectância ao longo da faixa de comprimento de onda analisada. Isto serviu como um bom indicativo de que, de maneira geral, não houve interferência nas medidas de reflectância da água por contribuição de radiância refletida pelo material do fundo dos corpos d'água. No entanto, essa hipótese não pode ser totalmente descartada em meio a um ambiente tão diversificado pelas variações na composição água e profundidade dos corpos d'água. Os sedimentos em suspensão são os principais agentes que determinam o aumento da turbidez e a redução da profundidade *Secchi*. Foi observada alta correlação entre R_{λ} e turbidez e correlação negativa entre R_{λ} e profundidade *Secchi*.

O aumento de concentração de sedimentos em suspensão provoca aumento de R_{λ} em todos os comprimentos de onda (Chen et al., 1992; Curran e Novo, 1988). Por isso, foram observadas correlações positivas em toda faixa espectral para as medidas de concentração de sedimentos inorgânicos (SIS) e orgânicos (SOS) em suspensão. O coeficiente máximo de correlação entre SIS e R_{λ} foi +0,79, em torno de 690 nm.

As concentrações de clorofila-*a* (Cl-*a*) são baixas no período de cheia. Portanto, seus efeitos espectrais não são muito expressivos. A Cl-*a* apresentou máxima correlação negativa com R_{λ} em torno de 675 nm ($r = -0,36$). Isto é coerente com a feição espectral de absorção de luz pelas algas para a atividade de fotossíntese.

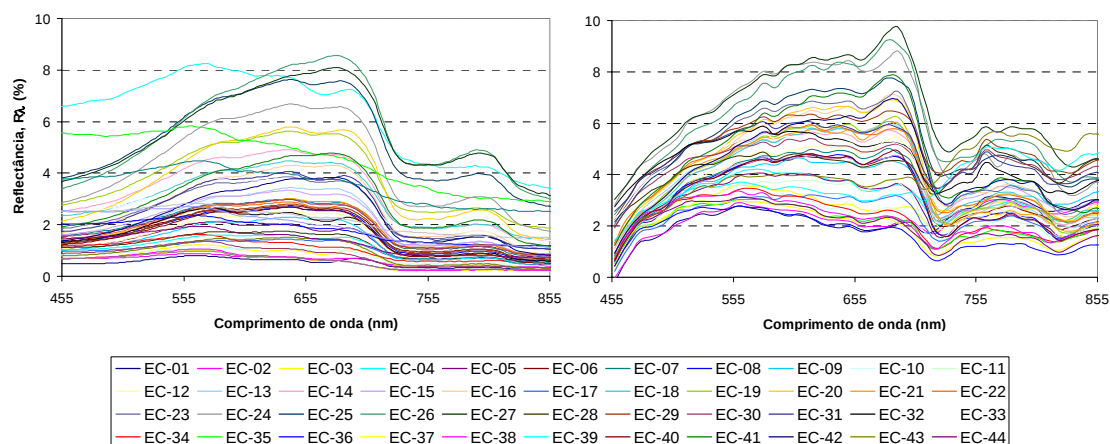


Figura 4.33 - Espectros de reflectância: medidos nas estações de coleta (esquerda) durante a campanha de campo realizada entre 23/06/05 e 29/06/05; e espectros extraídos de pixels da imagem Hyperion (direita) adquirida 23/06/2005, geograficamente correspondentes às estações de coleta (ver Figura 3.6).

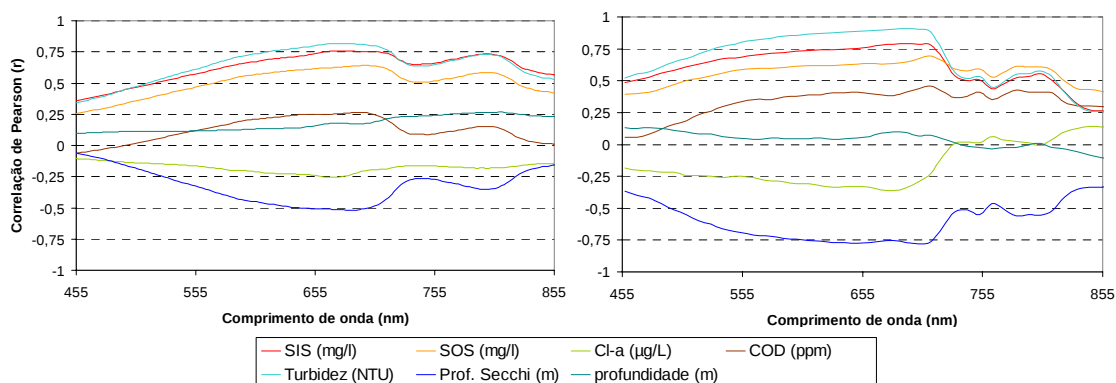


Figura 4.34 - Correlogramas obtidos entre as medidas de reflectância e parâmetros limnológicos selecionados: dados de campo (esquerda); e dados do sensor Hyperion (direita).

As águas pretas apresentam baixa turbidez e a R_λ é reduzida na faixa do azul devido à absorção de luz provocada pela matéria orgânica dissolvida. A medida de carbono orgânico dissolvido (COD) é considerada em diversos trabalhos como sendo um bom indicador de matéria orgânica dissolvida colorida. Porém, não foi verificada uma correlação negativa entre a concentração de COD e a R_λ Hyperion na faixa do azul. Esta correlação pouco significativa é explicada pelo fato de que as águas brancas escoadas pelo rio Amazonas trazem matéria orgânica dissolvida junto com altas concentrações de sedimentos em suspensão. A matéria orgânica dissolvida não pode ser detectada em

águas turbidas, uma vez que o espalhamento produzido por sedimentos em suspensão se torna muito mais dominante.

4.3.2 Análise Derivativa

Os espectros de reflectância foram suavizados usando um filtro de média de três pontos para reduzir ruídos aleatórios (Tsai e Philpot, 1998). Os dados de campo apresentam maior resolução espectral e a diferença entre os espectros originais e os filtrados é pouco perceptível (Figura 4.35). Por outro lado, a aplicação do filtro reduz algumas oscilações radiométricas observadas nos espectros Hyperion (Figura 4.36). Após realizar a filtragem em todos os espectros dos dois conjuntos de dados, a primeira derivada espectral (DR_λ) foi calculada.

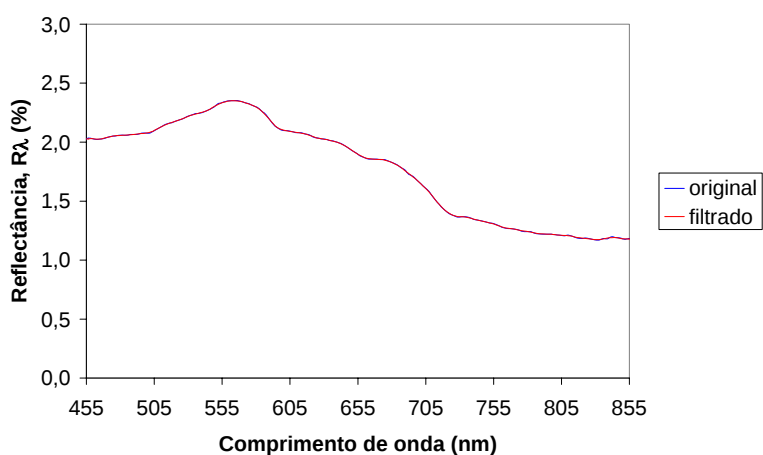


Figura 4.35 - Efeito de aplicação de filtro de média de três pontos sobre o espectro de campo medido na estação EC-43.

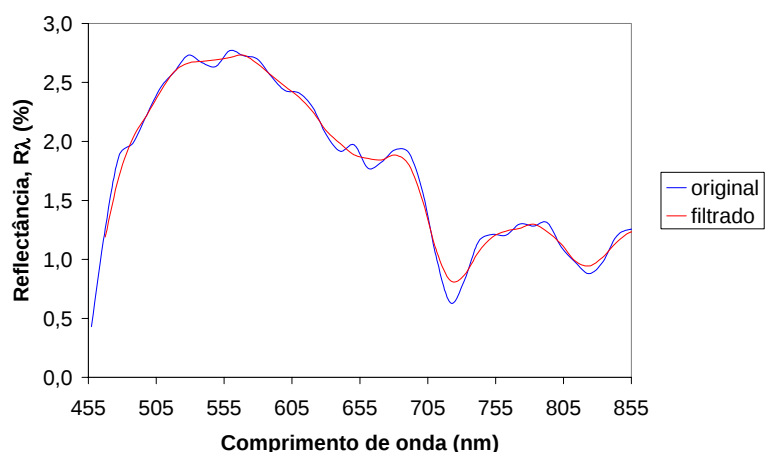


Figura 4.36 - Efeito de aplicação de filtro de média de três pontos sobre o espectro medido pelo sensor Hyperion na estação EC-43.

A primeira derivada espectral (DR_{λ}) aplicada sobre os espectros de campo e de imagem Hyperion apresentaram formas relativamente similares (Figura 4.37). Os correlogramas obtidos também apresentaram resultados próximos (Figura 4.38). Em relação aos resultados obtidos por Chen et al. (1992) usando dados de laboratório, os valores absolutos de correlação foram menores para ambos os dados SPECTRON SE-590 (nível de campo) e Hyperion (nível orbital).

Coeficientes de correlação (r) positiva entre SIS e DR_{λ} em torno de 0,75 ou maiores foram observados ao longo da faixa de comprimento de onda de 455-630 nm para os dados SPECTRON SE-590 (Figura 4.38). Nesta faixa espectral, apenas as bandas individuais em torno de 569 nm, 610 nm e 640 nm atingiram correlações próximas a 0,75 para os dados Hyperion (Figura 4.38). Correlações negativas entre SIS e DR_{λ} em torno de 0,80 foram observadas para os dados SPECTRON SE-590, ao longo da faixa de comprimento de onda de 710-740 nm e 805-855 nm. Para os dados Hyperion, foram observados correlações de -0,65 e +0,75 nas faixas espectrais de 701-732 nm e 805-855 nm, respectivamente. O coeficiente máximo de correlação entre SIS e R_{λ} foi de +0,79 em 681 nm (Figura 4.34), enquanto as melhores correlações entre SIS e DR_{λ} foram obtidas em 671 nm (+0,85) e 814 nm (-0,76) para os dados Hyperion (Figura 4.38).

As feições espectrais características de águas com fitoplâncton não foram observadas de forma muito evidente nos espectros de reflectância. Em ambos os conjuntos de dados

(SPECTRON SE-590 e Hyperion), os coeficientes de correlação entre $Cl-a$ e R_λ foram menores que 0,4 ao longo de toda faixa espectral analisada (Figura 4.34). Observou-se uma banda de absorção de $Cl-a$ em 681 nm com correlação negativa de -0,25 para os dados de campo e -0,36 para os dados orbitais. A aplicação da DR_λ proporcionou melhores potenciais para estimar a clorofila- a no período de cheia ao longo da PIAS. A correlação entre $Cl-a$ e DR_λ passou a atingir 0,8 no comprimento de onda de 686,6 nm para os dados medidos em campo e 0,7 no comprimento de onda de 691,4 nm para os dados Hyperion (Figura 4.38).

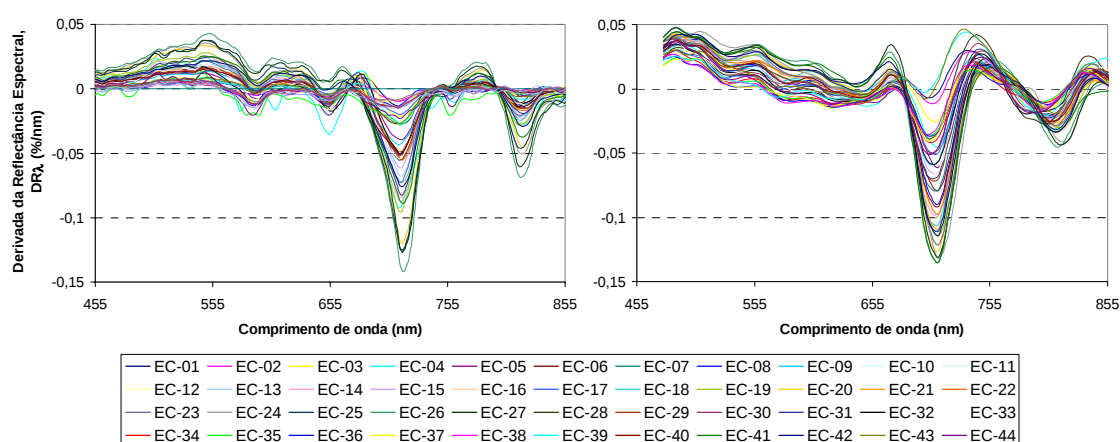


Figura 4.37 - Espectros resultantes da aplicação da primeira derivada (DR_λ) sobre: dados de campo (esquerda); e dados de pixels Hyperion (direita) geograficamente correspondentes às estações de coleta (ver Figura 3.6).

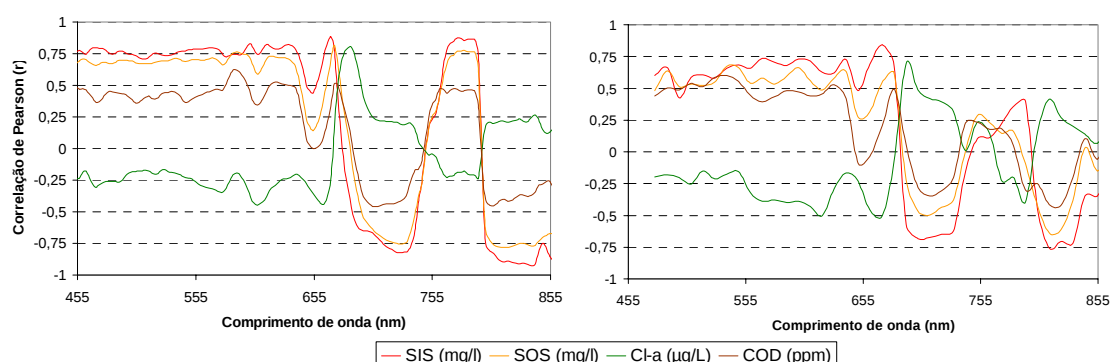


Figura 4.38 - Correlogramas obtidos entre a primeira derivada espectral (DR_λ) e medidas de Constituintes Opticamente Ativos: dados de campo (esquerda); e dados Hyperion (direita).

Em 691,4 nm (Figura 4.38) foram observados valores negativos de correlação comparativamente mais baixos da DR_λ (Hyperion) com os demais COAs (p.ex., $r = -0,57$ para sedimentos inorgânicos em suspensão). Portanto, da mesma forma que Han e

Rundquist (1997), pôde-se concluir que a primeira derivada espectral em 691 nm (DR_{691}), gerada pela diferença espectral entre o espalhamento em torno de 710 nm e a absorção em torno de 660 nm, é útil para estimar clorofila-*a* na presença de outros COAs.

Assim como a R_{λ} , a DR_{λ} também não pôde contribuir para a detecção de matéria orgânica dissolvida na presença de outros COAs. Os valores de correlação entre a DR_{λ} e a concentração de carbono orgânico dissolvido (COD) acompanharam a correlação da DR_{λ} com as concentrações de SIS e SOS, embora com menor intensidade.

Os dados Hyperion de reflectância apresentaram maiores valores absolutos de coeficiente de correlação (r) com os parâmetros de água em relação aos dados de reflectância campo (Figura 4.33 e Figura 4.34). O contrário ocorreu para os valores de correlação obtidos pela primeira derivada espectral (Figura 4.37 e Figura 4.38). Isto indica que a primeira derivada espectral pode ter sido mais eficiente na remoção de efeitos aditivos sobre a radiância medida nas condições de campo como, por exemplo, a influência da reflexão especular da água. Em nível orbital, a principal causa de variação de reflectância nos pixels foi a presença de brumas esparsas, que por sua vez, pode ter contribuído com alguns outros efeitos que não se comportaram de forma simplesmente aditiva. Um outro fator importante a ser considerado é a melhor resolução espectral do espectrorradiômetro de campo, que permite análises mais sensíveis na diferenciação de pequenas variações de reflectância produzidas pelos COAs.

4.4 Modelo Empírico para Inferência da Composição da Água por meio da Imagem Hyperion do Período de Cheia

Os valores da primeira derivada espectral (DR_{λ}), que apresentaram os melhores resultados de correlação na Figura 4.38, foram testados para estimar sedimentos inorgânicos em suspensão (SIS) e clorofila-*a* (Cl-*a*) espacialmente usando a imagem Hyperion do período de cheia (23/06/2005).

A Equação 4.1 ajustada entre SIS e DR_{671} apresentou coeficiente de determinação (R^2) igual a 85,2%. Quando aplicada ao conjunto de amostras separadas para fins de

validação, ela resultou em um erro RMS de 5,24 mg l⁻¹ (Figura 4.39). Um fator limitante ao uso da DR_{671} é o fato de que essa banda Hyperion apresentou muito ruído após a transformação derivativa. Portanto, a DR_{671} é um bom estimador de SIS, mas não foi adequada para reproduzir espacialmente as variações das concentrações de SIS.

$$SIS = 2,13644 - 262,478DR_{671} + 48928,8DR_{671}^2 \quad (4.1)$$

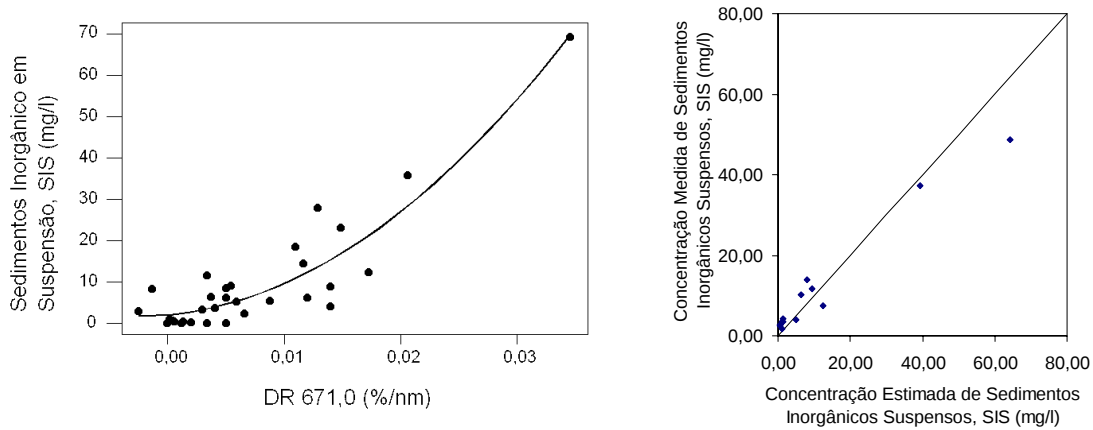


Figura 4.39 - Modelo empírico para estimar concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão no período de cheia a partir de DR_{671} .

Uma outra regressão preditiva foi considerada para explicar a variação de SIS. A Equação 4.2 ajustada entre SIS e DR_{711} apresentou R^2 igual a 80,9% e, quando aplicada ao conjunto de amostras separadas para validação, resultou em um erro RMS de 8,12 mg l⁻¹ (Figura 4.40). A primeira derivada em 711 nm resultou em uma imagem Hyperion de boa qualidade e foi usada para mapear a concentração de SIS em mg l⁻¹ sobre a PIAS (Figura 4.42(a)).

$$\log(SIS) = -2,76059 - 95,1812DR_{711} - 888,57DR_{711}^2 - 3131,89DR_{711}^3 \quad (4.2)$$

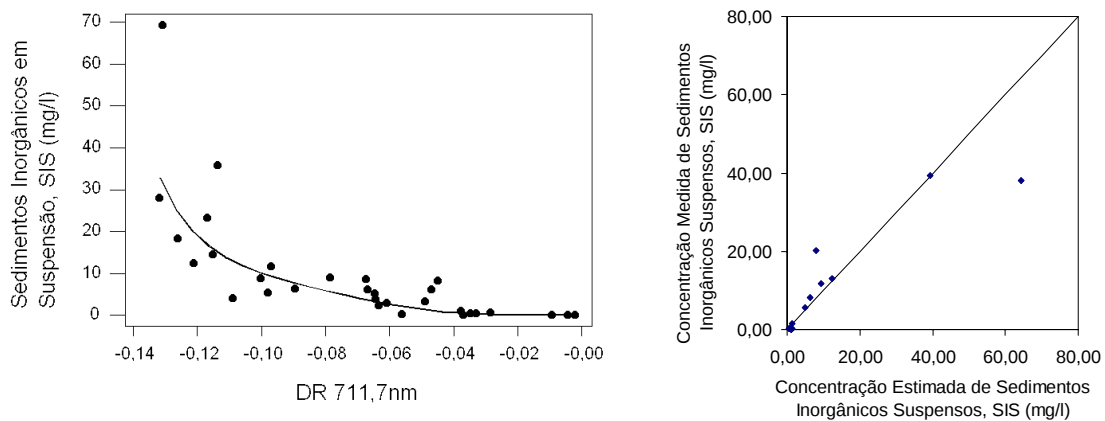


Figura 4.40 - Modelo empírico para estimar concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão no período de cheia a partir de DR_{711} .

Uma regressão preditiva foi ajustada entre $Cl-a$ e DR_{691} com R^2 igual a 68,3%. Este comprimento de onda também foi utilizado por Han e Rundquist (1997) para estimar $Cl-a$ em águas turbidas. A Equação 4.3 foi usada para estimar as concentrações de $Cl-a$ dos pontos extraídos, resultando em um erro RMS de $3,60 \mu g l^{-1}$ (Figura 4.41). A DR_{691} foi usada para produzir o mapeamento da concentração de $Cl-a$ sobre a PIAS (Figura 4.43(a)).

$$Cl - a = 32,3342 + 2177,76DR_{691,4} + 59360,7DR_{691,4}^2 + 539251DR_{691,4}^3 \quad (4.3)$$

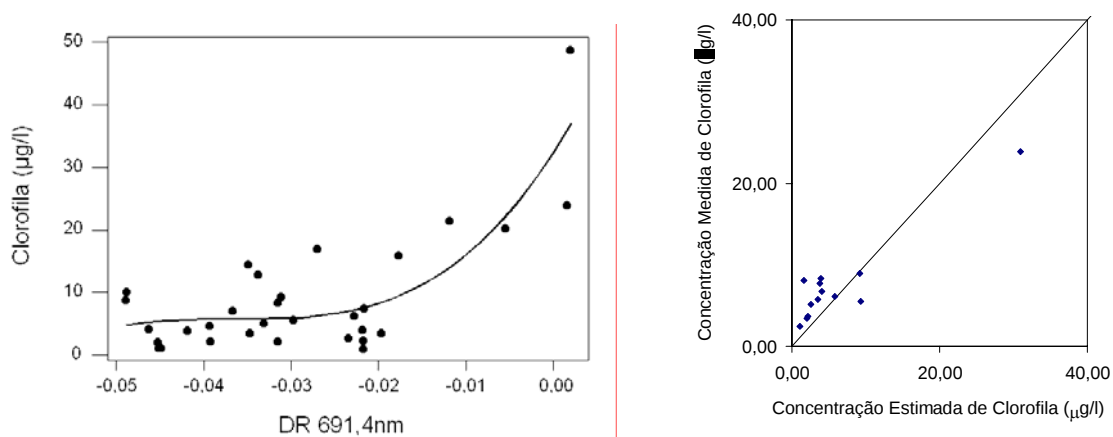


Figura 4.41 - Modelo empírico para estimar concentração de clorofila- a no período de cheia a partir de DR_{691} .

Além das variações nas concentrações de SIS e $Cl-a$ mostradas nas Figuras 4.42(a) e 4.43(a), as Figuras 4.42(b) e 4.43(b) ilustram também as variações de f_{SS} e $f_{fitoplâncton}$,

respectivamente. A partir de comparação visual dos mapeamentos obtidos com os modelos empíricos baseados na primeira derivada espectral e com o MLME são observadas concordâncias gerais na variação espacial dos dois COAs mapeados. Ambos os resultados referentes ao mapeamento de sedimentos em suspensão (Figura 4.42) demonstram a característica deste COA ser um traçador natural das correntes de água. Observa-se que, no período de cheia, as águas com elevado sedimentos em suspensão do rio Amazonas adentram os lagos da planície com menores turbidez. As regiões mapeadas com as maiores concentrações de Cl-*a*, especialmente a região situada ao norte do Lago Curumu, foram identificadas em ambos os mapeamentos (Figura 4.43). As áreas situadas ao sul do rio Amazonas e norte do rio Tapajós que foram afetadas por bruma, apresentam incertezas em relação a $f_{\text{fitoplâncton}}$ determinada pelo MLME. Tais incertezas também são indicadas pela imagem de erro RMS (ver Figura 4.10). Por outro lado, a bruma não apresentou impacto significativo sobre o mapeamento da Cl-*a* pelo modelo empírico baseado em DR_{691} .

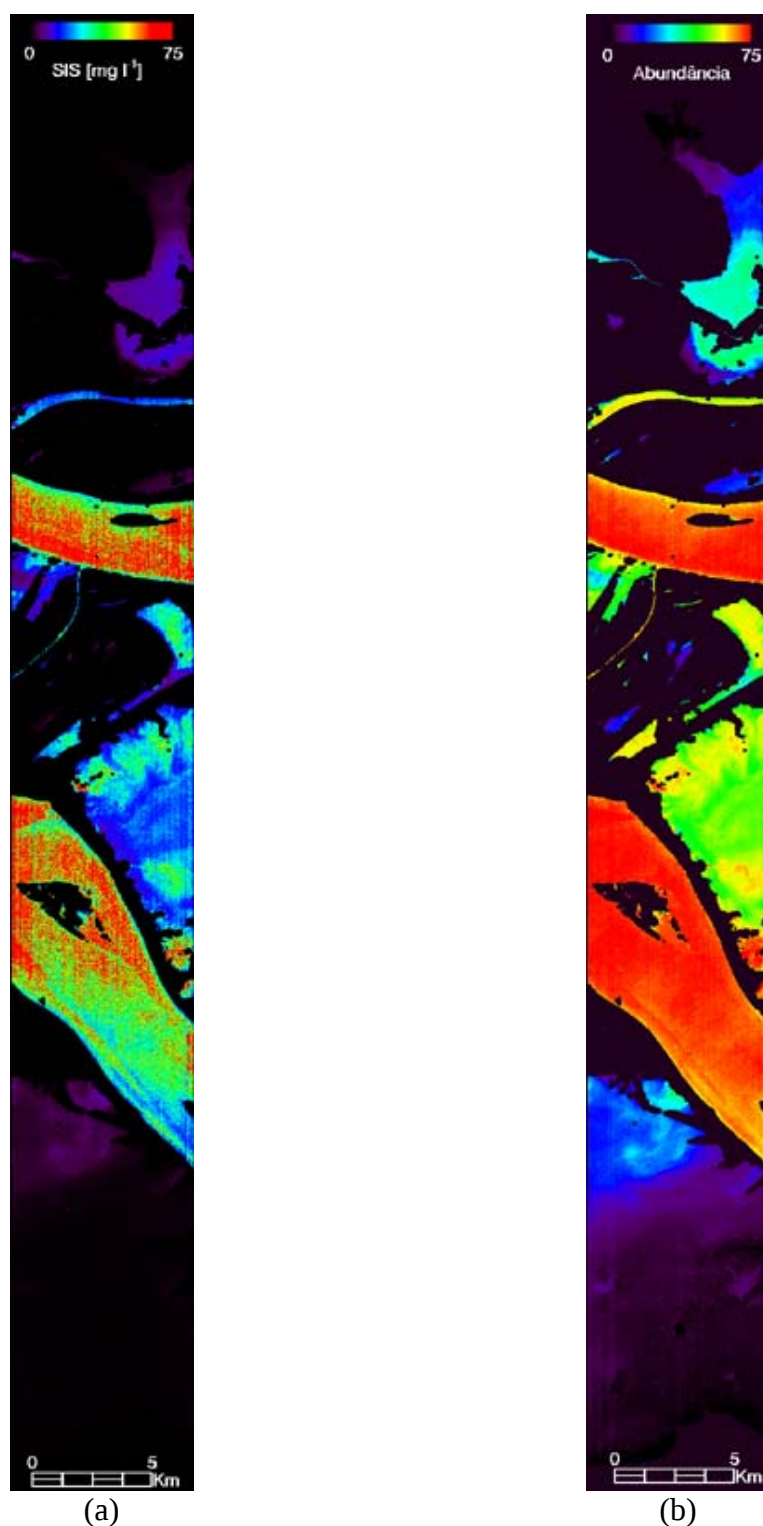


Figura 4.42 - (a) Variações na concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão (SIS em mg l^{-1}) na imagem Hyperion do período de cheia (23/06/2005), obtida a partir da equação de regressão da Figura 4.40; (b) Imagem de abundância fracional de sedimentos em suspensão (f_{ss}), resultante do Modelo Linear de Mistura Espectral.

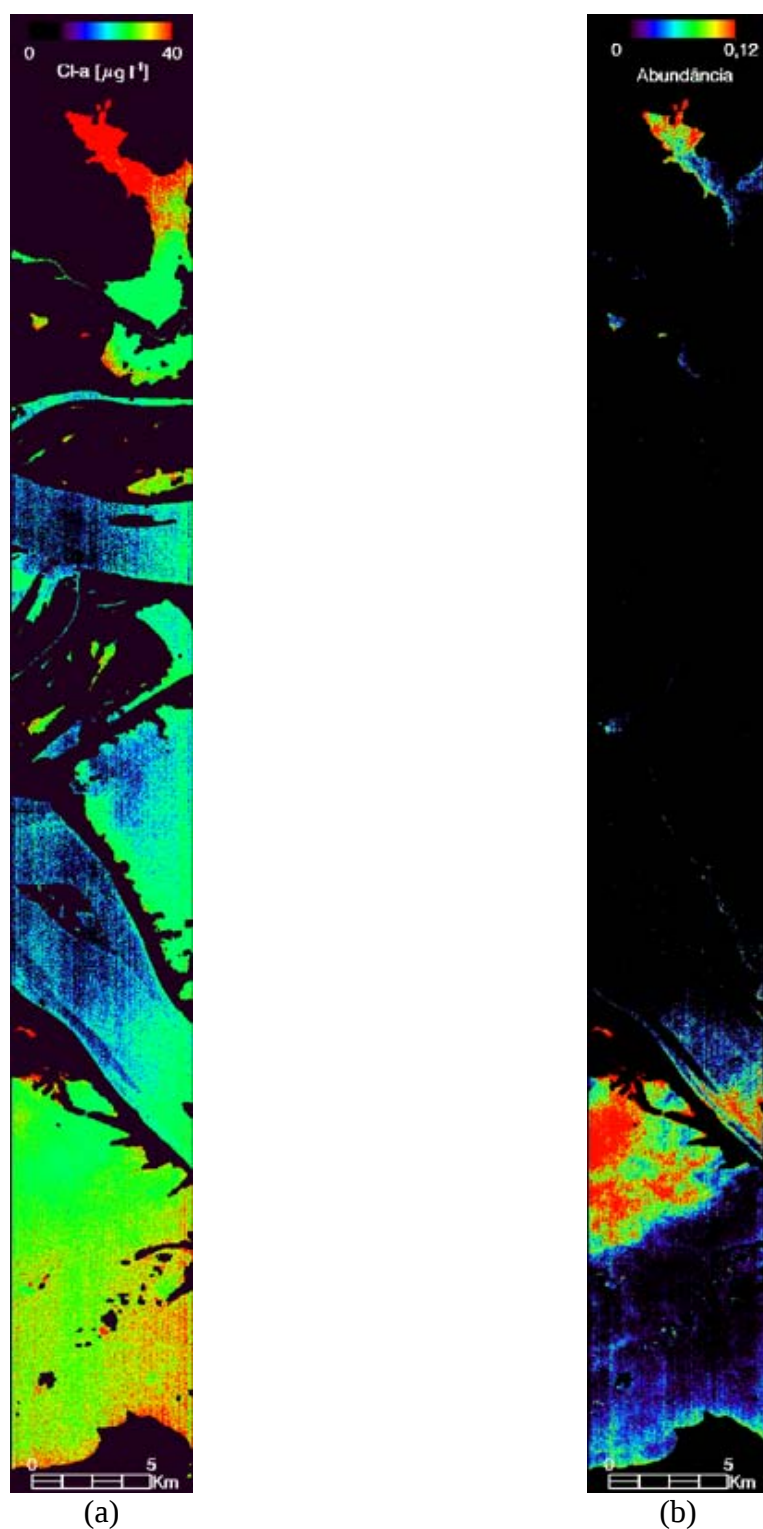


Figura 4.43 - (a) Variações na concentração de clorofila (Chl-*a* em $\mu\text{g l}^{-1}$) na imagem Hyperion do período de cheia (23/06/2005), obtida a partir da equação de regressão da Figura 4.41; (b) Imagem de abundância fracional de fitoplâncton ($f_{\text{fitoplâncton}}$), resultante do Modelo Linear de Mistura Espectral.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

As informações extraídas das imagens hiperespectrais, adquiridas pelo sensor orbital Hypeiron/EO-1, permitiram mapear os Constituintes Opticamente Ativos (COAs) da água sob uma visão sinóptica dos diversos sistemas aquáticos espalhados pela planície de inundação na área de estudo. Uma abordagem usando um Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e outra adotando modelos empíricos, baseados em parâmetros espectrais identificados por meio da primeira derivada espectral, demonstraram potenciais peculiares para caracterizar a composição das águas complexas Amazônicas. Os resultados do MLME se expressam por meio de valores de abundâncias fracionais que indicam as proporções de massas de água dominadas por COAs. O modelo empírico expressa seus resultados diretamente em termos das concentrações dos COAs na água. Embora estes dois métodos apresentem resultados com significados diferentes, os resultados aparentam ser convergentes em termos dos mapeamentos espaciais obtidos.

Em relação à caracterização e mapeamento de águas amazônicas através do uso do MLME, pôde-se concluir que:

1) A dinâmica temporal de mudança na composição de água na planície é grande. Assim, a opção por seleccionar espectros “chave”, chamados Membros de Referência (MR), a partir das imagens Hyperion dos dois períodos analisados (cheia e vazante), proporcionou maior disponibilidade de pixels puros de águas dominadas pelos COAs de interesse ao mapeamento. Os Membros de Referência (MRs) de água clara e matéria orgânica dissolvida foram extraídos da imagem do período de cheia, enquanto que os MRs de sedimentos em suspensão e fitoplâncton foram extraídos da imagem do período de vazante. Esta decisão foi fundamental para obter bons resultados pela análise das imagens hiperespectrais usando o MLME.

2) Na análise da imagem Hyperion adquirida no período de cheia, as abundâncias fracionais dos MRs selecionados ($f_{\text{água clara}}$; f_{MOD} ; f_{SS} ; e $f_{\text{fitoplâncton}}$) apresentaram relações significativas com as concentrações de COAs e com outros parâmetros não ópticos que ajudaram na caracterização da água. Porém, conforme foi alertado previamente por Novo e Shimabukuro (1994), é necessário ter bastante cuidado ao analisar as abundâncias fracionais determinadas pelo MLME.

3) A partir da análise temporal das duas imagens Hyperion, considerando sete regiões escolhidas estrategicamente ao longo da área de estudo, foi observada uma tendência geral de aumento nas concentrações de sedimentos em suspensão e fitoplâncton para o período de vazante. Em três lagos da planície de inundação as abundâncias fracionais de ambos sedimentos em suspensão (f_{SS}) e fitoplâncton ($f_{\text{fitoplâncton}}$) foram significativamente maiores na vazante. No rio Tapajós de água clara e em um lago de igapó de água preta, apenas as concentrações de fitoplâncton foram comparativamente maiores na vazante. O rio Amazonas se comporta de forma diferenciada ocorrendo diminuição de sedimentos em suspensão no período de vazante.

De maneira geral, o MLME pode ser empregado a imagens adquiridas em diferentes períodos do pulso de inundação, contanto que sejam utilizados MRs ‘puros’, ou seja, espectralmente distintos sendo cobertos por água com apenas um COA predominante. Recomenda-se que outras imagens hiperespectrais sejam consideradas para continuar a caracterização espectral das massas de águas ao longo de todo o ciclo de inundação, visando melhor entender a dinâmica espaço-temporal das misturas de massas de águas na planície de inundação. A composição de uma “biblioteca espectral” ao longo dos quatro períodos importantes do pulso de inundação (enchente, cheia, vazante e seca) pode ser útil em mapeamentos futuros. As variações sobre a não-linearidade dos efeitos de mistura espectral, também, precisam ser analisadas para as diferentes situações encontradas ao longo dos quatro períodos.

A análise espectral conduzida para construir relações empíricas e estimar a distribuição espacial da concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão e de clorofila-*a*, indicou a primeira derivada espectral da reflectância em praticamente os mesmos

comprimentos de onda específicos determinados por Chen et. al. (1992) e Han e Rundquist (1997), respectivamente. Diferentemente das regressões lineares obtidas por estes autores, os ajustes das regressões entre os dados Hyperion e as concentrações de sedimentos inorgânicos em suspensão e de clorofila-*a*, ambos foram não-lineares. Isto aponta para a maior complexidade óptica das águas continentais da planície de inundação Amazônica.

Embora haja maior precisão na determinação da variação espacial das concentrações de COAs por meio dos algoritmos empíricos, estes são estabelecidos somente com auxílio de dados de verdade de campo e são úteis apenas dentro do contexto sazonal a partir do qual foi determinado. Isto é verificado devido às significativas alterações no intervalo de variação das concentrações dos COAs, imposta pelo pulso de inundação. Por exemplo, no caso analisado neste trabalho, os algoritmos empíricos determinados a partir da primeira derivada espectral para estimar sedimentos em suspensão ou clorofila-*a* com dados do período de cheia não podem ser usados para produzir estimativas confiáveis para o período de vazante. Assim, é preciso que os estudos avancem no sentido de estabelecer outros modelos empíricos, visando atender aos intervalos específicos de variação das concentrações dos COAs em cada período do pulso de inundação.

As informações sobre a variação espacial dos constituintes da água e sua dinâmica de circulação, possivelmente monitorada por imagens orbitais ao longo do pulso de inundação na planície, fornecem evidências que ajudam a responder diversas questões sobre as inter-relações das estruturas e funções que regem o ecossistema aquático Amazônico. Estudos devem continuar sendo realizados para aumentar a precisão das estimativas. Com o avanço nas metodologias de análise de imagens hiperespectrais orbitais, as fontes de erros poderão ser melhor identificadas e minimizadas. Certamente a correção atmosférica terá influência sobre os resultados, os quais dependerão de uma melhor adequação dos modelos para a atmosfera Amazônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arst, H. **Optical properties and remote sensing of multicomponental water bodies**. Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2003. 231p.

Aspinall, R. J.; Marcus, W. A.; Boardman, J. W. Considerations in collecting, processing, and analysing high spatial resolution hyperspectral data for environmental investigations. **Journal of Geographical Systems**, v. 4, n. 1, p. 15-29, 2002.

Barbosa, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai / rio Amazonas**. 2005. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Barbosa, C. C. F.; Novo, E.M.L.M.; Carvalho, J.C.; Filho, W.P.; Mantovani, J.E. Caracterização espectral das massas d'água Amazônicas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2419 - 2425.

Boardman, J. W.; Kruse, F. A. Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. In: Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10., 1994, Ann Arbor, USA. **Proceedings...** Michigan: Environmental Research Institute of Michigan, 1994. p. I-407 - I-418.

Boardman, J. W.; Kruse, F. A.; Green, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 5., 1995, Pasadena, USA. **Proceedings...** Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1995. p. 23-26.

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. J., J.H.; Kondratyev, K.Ya.; Pozdnyakov, D.V. **Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters**. Boca Taton: CRC Press LLC, 2000.

362p.

Carvalho, J. C.; Barbosa, C.; Novo, E. M. L. M.; Mantovani, J. E.; Melack, J.; Filho, W. P. Applications of quantitative analysis techniques to monitor water quality of Curuai Lake, Brazil. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. Toulouse, France. **Proceedings...** Piscataway: IEEE International, 2003. v. 4, p. 2362-2364.

Chen, Z.; Curran, P. J.; Hansom, J. D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing of Environment**, v. 40, n.1, p. 67-77, 1992.

Costa, M. **Uso de dados Hyperion para mapear a qualidade de águas costeiras do Canadá**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005).

Comunicação pessoal

Curran, P. J.; Novo, E. M. L. M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. **Journal of Coastal Resources**, v. 4, p. 351-368, 1988.

Dekker, A. G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing. Ph.D Thesis - Free University, Amsterdam.

1993.

Galvão, L. S.; Pereira, W.; Abdon, M. M.; Novo, E. M. L. M.; Silva, J. S. V.; Ponzoni, F. J. Spectral reflectance characterization of shallow lakes from the brazilian Pantanal wetlands with field and airborne hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n.21, p. 4093-4112, 2003.

Gao, B.; Goetz, A. F. H. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n.D4, p. 3549-3564, 1990.

Gao, B. C.; Montes, M. J.; Davis, C. O. Refinement of wavelength calibrations of hyperspectral imaging data using a spectrum-matching technique. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n.4, p. 424-433, 2004.

Gitelson, A. A.; Yacobi, Y. Z.; Rundquist, D. C.; Stark, R.; Han, L.; Etzion, D. Remote estimation of chlorophyll concentration in productive waters: principals, algorithm development and validation. In: NWQMC National Monitoring Conference, 2000, Austin, USA. **Proceedings...** NWQMC, 2000. Disponível na internet: http://www.nwqmc.org/2000proceeding/papers/pap_gitelson.pdf. Acesso em: 22 mai. 2006.

Goodenough, D. G.; Dyk, A.; Niemann, O.; Pearlman, J. S.; Chen, H.; Han, T.; Murdoch, M.; West, C. Processing Hyperion and ALI for forest classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n.6, p. 1321-1331, 2003.

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 photogramm. **Eng. Remote Sensing**, v. 59, n.4, p. 505-510, 1993.

Gordon, H. R.; Clark, D. K. Clear water radiances for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery. **Applied Optics**, v. 20, n.24, p. 4175-4180, 1981.

Green, A. A.; Berman, M.; Switzer, B.; Craig, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n.1, p. 65-74, 1988.

Green, R. O.; Pavri, B. E.; Chrien, T. G. On-orbit radiometric and spectral calibration characteristics of EO-1 Hyperion derived with an underflight of AVIRIS and in situ measurements at Salar de Arizaro, Argentina. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n.6, p. 1194-1203, 2003.

Han, L.; Rundquist, D. C. Comparison of NWRED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir. **Remote Sensing of the Environment**, v. 62, p. 253-261, 1997.

Han, T.; Goodenough, D. G.; Dyk, A.; Love, J. Detection and correction of abnormal pixels in Hyperion images. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. Toronto, Canada. **Proceedings...** Piscataway: IEEE International, 2002. p. 1327-1330.

Jensen, J. R. Remote sensing of water. In: Jensen, J. R. (ed.) **Remote sensing of the environment**: an Earth resource perspective. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2000. cap. 11, p. 379-406.

Junk, W. J. **The Central Amazon floodplain**. Berlin: Springer, 1997. 525p.

Junk, W. J.; Fruch, K. The physical and chemical properties of Amazonian waters and their relationships with the biota. In: Prance, G. T.; Lovejoy, T. E. (eds.) **Key environments: Amazonia**: Oxford: Pergaman Press Ltd., 1985. p. 3-17.

Junk, W. J.; Silva, C. J. Neotropical floodplains: a comparison between the Pantanal of Mato Grosso and the large Amazonian river floodplains. In: Tundisi, J. G.; Bicudo, C. E. M.; Tundisi, T. M. (eds.) **Limnology in Brazil**. Rio de Janeiro: ABC/SBL, 1995. p. 195-217.

Kirk, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 401 p.

Kirk, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 2. ed.** Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

Kruse, F. A. Preliminary results - hyperspectral mapping of coral reef systems using EO-1 Hyperion, Buck Island, U.S. Virgin Islands. In: JPL Airborne Earth Science Workshop, 12., 2003, Pasadena, USA. **Proceedings...** Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2003. p. 157-173.

Kruse, F. A.; Boardman, J. W. Characterization and mapping of Kimberlites and related diatremes using hyperspectral remote sensing. In: 2000 IEEE AeroSpace Conference, 2000. Big Sky, USA. **Proceedings...** Piscataway: IEEE International, 2000. p. 299-304.

Kruse, F. A.; Boardman, J. W.; Huntington, J. F. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n.6, p. 1388-1400, 2003.

Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. W.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P. J.; A.F.H., G. The spectral Image-Processing System (Sips) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n.2-3, p. 145-163, 1993.

Malthus, T. J. **Inland water quality remote sensing: operational and future applications**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., Belo Horizonte: INPE, abr. 2003. transparências em arquivo digital.

Martinez, J. M.; Seyler, F.; Bourgoïn, L. M.; Moreira-Turcq, P.; Guyot, J. L. Amazon Basin water quality monitoring using MERIS and MODIS data. In: Envisat & ERS Symposium, 2004, Salzburg, Austria. **Proceedings...** Noordwijk: European Space Agency, 2004.

McGwire, K.; Minor, T.; Fenstermaker, L. Hyperspectral mixture modeling for quantifying sparse vegetation cover in arid environments. **Remote Sensing of the Environment**, v. 72, p. 360-374, 2000.

Méléder, V.; Barillé, L.; Launeau, P.; Carrère, V.; Rincé, Y. Spectrometric constraint in analysis of benthic diatom biomass using monospecific cultures. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, p. 386-400, 2003.

Milton, E. J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n.12, p. 1807-1827, 1987.

Nash, D. B.; Conel, J. E. Spectral reflectance systematics for mixtures of powdered hypersthene, labradorite, and ilmenite. **Journal of Geophysical Research**, v. 79, n. 11, p. 1615-1621, 1974.

Novo, E.; Pereira, W.; Melack, J. M. Assessing the utility of spectral band operators to reduce the influence of total suspended solids on the relationship between chlorophyll concentration and the bidirectional reflectance factor in Amazon waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n.22, p. 5105-5116, 2004.

Novo, E. M.; Shimabukuro, Y. E. Spectral Mixture Analysis of Inland Tropical Waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n.6, p. 1351-1356, 1994.

Novo, E. M. L.; Lobo, F.; Calijuri, M. C. Remote sensing and geographical information system application to inland water studies. In: Tundisi, J. G.; Bicudo, C. E. M.; Tundisi, T. M. (eds.) **Limnology in Brazil**. Rio de Janeiro: ABC/SBL, 1995. p. 283-304.

Novo, E. M. L. M.; Barbosa C. C. F.; Freitas R. M.; Shimabukuro Y. E.; Melack J. M.; e Pereira-Filho W. Seasonal changes in phytoplankton distribution in floodplain lakes in response to Amazon flood pulse derived from MODIS images. **Limnology** accepted 2005.

Novo, E. M. L. M.; Steffen, C. A.; Braga, C. Z. F. Results of a laboratory experiment relating spectral reflectance to total suspended solids. **Remote Sensing of Environment**, v. 36, n.1, p. 67-72, 1991.

Novo, E. M. M.; Hansom, J. D.; Curran, P. J. The Effect of Sediment Type on the Relationship between Reflectance and Suspended Sediment Concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n.7, p. 1283-1289, 1989a.

Novo, E. M. M.; Hansom, J. D.; Curran, P. J. The Effect of Viewing Geometry and Wavelength on the Relationship between Reflectance and Suspended Sediment Concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n.8, p. 1357-1372, 1989b.

Nush, E. A. **Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination**. Stuttgart: Arch. Hydrobiol. Beih. n. 14, p. 14-39, 1980.

Research Systems Inc. (RSI). **ENVI user's guide**. Boulder, 1999.

Ritchie, J. C.; Cooper, C. M.; Schiebe, F. R. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n.2, p. 137-148, 1990.

Ritchie, J. C.; Cooper, C. M.; Yongqing, J. Using landsat multispectral scanner data to estimate suspended sediments in Moon Lake, Mississippi. **Remote Sensing of Environment**, v. 23, n.1, p. 65-81, 1987.

Rudorff, C. M.; Arraut, E. M.; Barbosa, C. C. F.; Carvalho, J. C.; Filho, W. P.; Novo, E. M. L. M. Avaliação de algoritmos bio-ótico em massas d'água amazônicas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 431-438. Disponível na biblioteca digital URLib: <ltid.inpe.br/sbsr/>. Acesso em: 22 abr. 2006.

Singer, R. B. Near-infrared spectral reflectance of mineral mixtures: Systematic combinations of pyroxenes, olivine, and iron oxides. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, p. 7967-7982, 1981.

Singer, R. B.; Mccord, T. B. Mars: Large scale mixing of bright and dark surface materials and implications for analysis of spectral reflectance. In: Lunar and Planetary Science Conference, 10., 1979. Houston. **Proceedings...** New York: Pergomon Press, 1979. v. 2, p. 1835-1848.

Sioli, H. **The Amazon**: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. Dordrecht: Dr W. Junk Publishers, 1984. 763p.

Thiemann, S.; Kaufmann, H. Determination of Chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRIS-1C satellite data in the Meckleburg Lake District. **Remote Sensing of the Environment**, v. 73, n. 2, p. 227-235, 2000.

Tsai, F.; Philpot, W. Derivative Analysis of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n.1, p. 41-51, 1998.

Tundisi, J. G. Tropical South America: Present and perspectives. In: Margalef, R. (ed.) **Limnology now: a paradigm of planetary problems**. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1994. p. 353-372.

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

Weaver, E. C.; Wrigley, R. **Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing**. Moffet Field: NASA, 1994. 124p.

Wetzel, R. G.; Likens, G. E. **Limnological Analyses**. New York: Springer-Verlag, 1991.

APÊNDICE A

PARÂMETROS DE ÁGUA MEDIDOS EM LABORATÓRIO

A.1 Método da Clorofila-a

Amostras de água bruta são filtradas em filtros de fibra de vidro Whatman GF/F. Após a filtração, os filtros são mantidos no escuro por meia hora sobre papéis de filtro para remoção do excesso de água. Posteriormente os filtros são guardados em frasco escuro contendo sílica-gel e mantidos a temperaturas inferiores a 0 °C antes da análise.

A análise foi realizada segundo Nush (1980). A clorofila foi extraída com etanol 80 % a quente (75 °C) por 5 minutos em tubos de ensaio e, em seguida, foi feito um choque térmico mergulhando os tubos em água gelada (0 °C). A extração foi mantida por um período de 6 a 24 horas no refrigerador e na ausência de luz. A solução de etanol contendo clorofila extraída foi passada para tubo de vidro encapado de 20 ml de capacidade e a leitura foi feita por espectrofotometria em cubetas de quartzo de 50 mm de caminho óptico nos seguintes comprimentos de onda: 750 nm e 665 nm. Após a leitura, a amostra foi acidificada com HCl 0,4 N para um pH entre 2,4 e 2,8, e a leitura foi feita novamente em 750 e 665 nm para determinação de feofitina.

Equipamentos utilizados:

filtrador de polisulfona marca Millipore para filtros de 47 mm de diâmetro;

espectrofotômetro marca Varian, modelo Cary-50 Conc;

chapa aquecedora marca Corning.

Precisão do método: 0,1 µg l⁻¹

A.2 Método para Análise de Sedimentos em Suspensão

Descrição: A análise de sedimentos em suspensão teve como base o método de Wetzel e Likens (1991). Um volume conhecido de amostra de água bruta foi filtrada em filtro de

fibra de vidro Whatman GF/C pré-calcinado a 480 °C e pesado. O filtro contendo material foi secado sobre um papel de filtro e guardado em envelope etiquetado. Este, por sua vez, foi guardado em um frasco contendo sílica gel.

No laboratório, o filtro foi secado a 60 °C por um período de 24 horas e pesado para determinação da concentração total de sedimentos em suspensão. Em seguida, o filtro foi colocado em cadinho de porcelana numerado e levado à mufla por um período de 1 hora a 480 °C. O cadinho com o filtro foi levado ao dessecador contendo sílica-gel, mantido até o resfriamento e novamente pesado para determinação da concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão. Pela diferença entre o total e a parcela inorgânica de sedimentos em suspensão, a concentração de sedimentos orgânicos em suspensão foi determinada.

Equipamentos utilizados:

filtradores de polisulfona marca Millipore para filtros de 47 mm de diâmetro e volume do copo de 250 mL;

balança micro-analítica digital marca Mettler, modelo MT5 (detecção: 0,001 mg);

estufa marca Fanem;

mufla marca FANEM.

Precisão do método: 0,005 mg l⁻¹.

A.3 Método para Determinação de Carbono Orgânico e Inorgânico Dissolvido

Para a determinação das concentrações destes parâmetros foi utilizado o método de análise de gás por infravermelho, onde a amostra de água foi passada ao estado gasoso por combustão não dispersiva a 680 °C, através do Analisador de Carbono Orgânico Total – SHIMADZU, modelo TOC-5000.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.