



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/04.12.16.46-TDI

**DADOS FLUOROMÉTRICOS E ESPECTRAIS  
APLICADOS À ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE  
CLOROFILA NA PLANÍCIE DE CURUAI / RIO  
AMAZONAS**

Rafael Damiani Ferreira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Cláudio Clemente Faria Barbosa, e Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, aprovada em 30 de abril de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BML48H>>

INPE  
São José dos Campos  
2012

## **PUBLICADO POR:**

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) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2012/04.12.16.46-TDI

**DADOS FLUOROMÉTRICOS E ESPECTRAIS  
APLICADOS À ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE  
CLOROFILA NA PLANÍCIE DE CURUAI / RIO  
AMAZONAS**

Rafael Damiani Ferreira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Cláudio Clemente Faria Barbosa, e Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, aprovada em 30 de abril de 2012.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BML48H>>

INPE  
São José dos Campos  
2012

F413d Ferreira, Rafael Damiati.  
Dados fluorométricos e espectrais aplicados à estimativa da concentração de clorofila na planície de Curuai / Rio Amazonas / Rafael Damiati Ferreira. – São José dos Campos : INPE, 2012.

xxiv + 79 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/04.12.16.46-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

Orientadores : Drs. Cláudio Clemente Faria Barbosa, e Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo.

1. espectroscopia de fluorescência. 2. MODIS. 3. clorofila-a.  
4. planície de inundação amazônica. 5. sensoriamento remoto.  
I.Título.

CDU 528.88

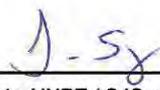
---

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

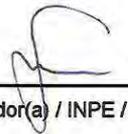
Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

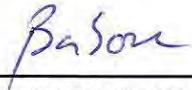
Dr. Lênio Soares Galvão

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Cláudio Clemente de Faria Barbosa

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. João Sarkis Yunes

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / FURG / Rio Grande - RS

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Rafael Damiatí Ferreira

São José dos Campos, 30 de abril de 2012



*“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.*

*José Saramago*



*À minha família  
Nelson, Graça, Daniela e Angela*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todas as pessoas e instituições que contribuíram para que esta etapa se tornasse uma realidade, mesmo que por ventura não tenham sido citadas nesta lista.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e à Coordenação acadêmica do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pela oportunidade e estrutura disponibilizada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de mestrado e pelo financiamento do projeto que permitiu a realização da missão de campo (Processo 550373/2010-1).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP por financiar o projeto que viabilizou a execução da campanha de campo na Amazônia (Processo 2008/07537-1).

Ao meu orientador Dr. Cláudio Clemente Faria Barbosa pela oportunidade, paciência e prontidão que teve comigo ao longo destes dois anos. O Cláudio é um exemplo da força de vontade na busca pelo conhecimento além da área de formação. Agradeço à minha orientadora Dra. Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo pelos caminhos abertos, incentivos e conhecimentos compartilhados. Além de referência como cientista, a Evlyn é uma soma de determinação e humildade incríveis. Sinto-me profundamente honrado de ter trabalhado neste grupo!

Ao Sr. Flaurido e tripulação do Eloin pelo apoio em nossa missão de campo na Amazônia. Um grande abraço ao Joaquim Leão pelo apoio não só durante a missão, mas pela disposição em ajudar sempre.

Aos colegas de turma da PGSER 2010, da Batcaverna, do Tenso F.C. e aos demais colegas do INPE. Arrisco-me aqui a citar quatro nomes, pela importância direta que tiveram na concretização dessa jornada, mesmo sabendo que estarei omitindo outros. Um abraço especial à Luciane Sato e à Tathiane Anazawa por toda ajuda e atenção que me dispensaram ao longo do período das disciplinas e pelas divertidas conversas durante os cafés. Agradeço ao grande amigo Kleber Trabaquini pela amizade, experiências compartilhadas e bons momentos vividos. Agradeço também ao Lino Augusto Sander de Carvalho pelos conselhos, paciência e a boa vontade de sempre me ajudar.

Aos velhos amigos de São José e de Rio Claro que entenderam os momentos de ausência e, mesmo com a distância, nunca deixaram de me apoiar.

Agradeço à Graziela Meneghetti pela confiança, apoio, incentivo e compreensão no difícil período das disciplinas. A Graziela teve também um papel muito importante na minha decisão de cursar o mestrado no INPE, motivo pelo qual sou extremamente grato.

A meus pais, Nelson e Graça, pela confiança e apoio de sempre nas minhas escolhas profissionais. Eles me receberam novamente em casa de braços abertos, facilitando muito o meu dia-a-dia ao longo do mestrado. Agradeço também à minha irmã Daniela, à minha tia Angela, ao Thiago e à Ciça pelo carinho, incentivo e momentos de descontração.

## RESUMO

A eutrofização é um processo frequente em ambientes aquáticos continentais que resulta na presença de grandes concentrações de clorofila-a (Chl-a) na água. Tradicionalmente, a quantificação da Chl-a é realizada através da coleta de amostras em campo, seguida do armazenamento e transporte adequado até a análise final em laboratório. Entretanto, este é um processo que envolve grandes custos logísticos e analíticos, principalmente em estudos realizados em regiões remotas. Estes fatores implicam na demanda por métodos de amostragem baratos e eficientes, dentre os quais as técnicas de espectroscopia de fluorescência e o sensoriamento remoto. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método para a estimativa da concentração de clorofila-a em águas opticamente complexas (Caso 2) utilizando dados limnológicos, fluorométricos e espectrais. A área de estudo compreende a região da planície de inundação amazônica do Lago Grande do Curuai – PA. Três principais etapas foram realizadas: aquisição dos dados *in situ*, análise da fluorescência e estimativa da concentração de clorofila por sensoriamento remoto. Na primeira etapa foram coletados parâmetros de qualidade da água em 27 estações amostrais distribuídas nos vários lagos da planície de inundação. A etapa de análise da fluorescência consistiu na busca por modelos de regressão entre a Chl-a e a fluorescência *in vivo* nas estações amostrais. Finalmente, na terceira etapa os valores de Chl-a obtidos através de análise laboratorial, bem como os estimados pela fluorometria foram utilizados na tentativa de gerar modelos de quantificação da Chl-a a partir dos dados espectrais *in situ* e de imagens MODIS. Os resultados indicam o potencial de aplicação da fluorometria para a estimativa da Chl-a em águas do Caso 2, tendo em vista o ajuste obtido ( $R^2=0,94$ ,  $p<10^{-5}$ ) no principal lago da planície de Curuai. Os dados de sensoriamento remoto permitiram obter ajustes entre a Chl-a das estações amostrais e as bandas da imagem MODIS adquiridas concomitantemente à realização da campanha de campo ( $R^2=0,69$ ,  $p<0,02$ ). Entretanto, não foi possível correlacionar os dados espectrais do produto MODIS com a Chl-a estimada pela fluorescência, tendo em vista as limitações técnicas do sensor (resolução espacial e espectral) e a complexidade do ambiente de estudo.



# FLUOROMETRIC AND SPECTRAL DATA APPLIED TO ESTIMATE CHLOROPHYLL CONCENTRATION IN FRESHWATER ENVIRONMENTS

## ABSTRACT

Eutrophication is a frequent process in freshwaters environments which results in high chlorophyll-*a* concentrations (Chl-*a*) in water. Chlorophyll quantification is usually based on collecting and filtering water samples, followed by appropriate storage and transportation for final laboratory analysis. This operation, although highly reliable and accurate, is time consuming and involves high logistical and analytical costs and may hinder studies in remote regions. These factors imply a demand for less expensive and faster sampling methods, among them the fluorescence spectroscopy and remote sensing techniques. The aim of this work was to develop a method for Chl-*a* estimation in optically complex waters (Case 2) based on limnological, spectral and fluorometric data. The study area comprises the Curuai Amazon floodplain region. Three major steps were accomplished: *in situ* data acquisition, fluorescence analysis and Chl-*a* estimation from remote sensing. In the first step, water quality parameters at 27 sampling stations distributed along the floodplain lakes were collected. The fluorescence analysis step consisted on the search for regression models between the Chl-*a* and *in vivo* fluorescence in sampling stations. Finally, in the third step the Chl-*a* values obtained through analytical method and the Chl-*a* estimated by fluorometry were used to generate models for Chl-*a* quantification by using *in situ* spectral data and MODIS image. The results indicate the potential of fluorometry to estimate Chl-*a* in Case 2 waters, since it was possible to fit a model ( $R^2 = 0.94$ ,  $p < 10^{-5}$ ) for the main lake of Curuai floodplain. Remote sensing data have allowed adjustments between the Chl-*a* from sampling stations and MODIS bands acquired simultaneously to field campaign ( $R^2 = 0.69$ ,  $p < 0,02$ ). spectra ( $R^2 = 0.75$ ), simulated MODIS bands ( $R^2 = 0.81$ ) and MODIS image bands acquired simultaneously to the field campaign ( $R^2 = 0.70$ ). However, it was not possible to correlate the MODIS spectral data with Chl-*a* estimated by fluorescence, in view of the technical limitations of the sensor (poor spatial and spectral resolution) and the environmental complexity of study area.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Representação da interação da REM com um corpo d'água. ....	5
Figura 2.2 - Espectro de absorção (a) e espalhamento (b) da água natural oceânica. ....	7
Figura 2.3 - Comportamento espectral da vegetação, água (limpa e turva) e solo (arenoso e argiloso). ....	9
Figura 2.4 - Comportamento espectral da água com diferentes concentrações de partículas em suspensão, expressas em $\text{mg.L}^{-1}$ , onde (a) apresenta amostras com predominância de argila e (b) amostras com predominância de silte. ....	11
Figura 2.5 - Comportamento espectral da água com diferentes concentrações de Chl- <i>a</i> . ....	12
Figura 2.6 – Classificação dos tipos de água em função da concentração dos COAs. ....	13
Figura 2.7 - Espectro de absorção e fluorescência da clorofila- <i>a</i> . ....	16
Figura 2.8 – Variações da IVF em função das mudanças de irradiância solar ao longo de um ciclo diurno. ....	18
Figura 2.9 – Comparação do espectro de absorção e da fluorescência para: (a) Chl- <i>a</i> , Chl- <i>b</i> , Chl- <i>c2</i> ; e (b) feofitina- <i>a</i> , feofitina- <i>b</i> e feofitina- <i>c2</i> . ....	19
Figura 2.10 - Esquema representativo de um fluorômetro de filtro operando em fluxo contínuo. ....	21
Figura 2.11 – Resposta da fluorescência em função do aumento da concentração de Chl- <i>b</i> (a) e feofitina- <i>a</i> (b) para diferentes configurações ópticas de um fluorômetro. ....	22
Figura 3.1 – Localização da Planície de Curuai - PA. ....	25
Figura 3.2 – Representação da dinâmica sazonal da água na Planície de Curuai - PA. ....	26
Figura 3.3 – Variação do TSS e Chl- <i>a</i> na Planície de Curuai para os quatro estados do ciclo hidrológico entre 2003 e 2004. ....	28
Figura 3.4 - Variação anual da cobertura de nuvens na região central da Amazônia. ....	29
Figura 3.5 - Fluxograma geral das etapas de trabalho. ....	29
Figura 3.6 - Localização das estações amostrais (pontos em vermelho) e dos transectos de fluorescência (amarelo, verde, azul, roxo, rosa e laranja). As cores dos transectos distinguem as datas de amostragem. ....	31
Figura 3.7 - Procedimentos de filtragem das amostras de água para a quantificação da Chl- <i>a</i> e TSS. ....	32
Figura 3.8 - Procedimentos de coleta e integração dos dados geográficos e de fluorescência. As fotos apresentam (a) a janela de visualização dos dados de fluorescência e coordenadas geográficas integrados; (b), (c) e (d) operação do fluorômetro, bomba autoescorvante e GPS, respectivamente; (e), (f) e (g) a instalação da haste de sustentação e mangueira de coleta de água. ....	35

Figura 3.9 - Fluxograma com a metodologia de análise de fluorescência proposta. ....	40
Figura 3.10 - Fluxograma das etapas de estimativa da Chl-a através do sensoriamento remoto.....	42
Figura 4.1 – Gráficos de dispersão entre a Chl-a e a IVF através dos métodos de estimativa instantâneo e da média na planície de Curuai.....	45
Figura 4.2 – Gráficos de dispersão entre as variáveis Chl-a e IVF, considerando os métodos de estimativa instantâneo e da média no Lago Poção. ....	47
Figura 4.3 – Gráficos de dispersão entre a IVF e a razão de componentes da água no lago Poção: (a) Feofitina/Chl-a; (b) Chl-a/COD; (c) Chl-a/TSS; (d) COD/TSS.....	49
Figura 4.4 - Gráficos de dispersão entre as variáveis Chl-a e IVF, considerando os métodos de estimativa instantâneo e da média no Lago Guariba. ....	50
Figura 4.5 – Gráficos de dispersão entre a IVF e a razão de componentes da água no lago Guariba: (a) Feofitina/Chl-a; (b) Chl-a/COD; (c) Chl-a/TSS; (d) COD/TSS.....	52
Figura 4.6 - Ajuste do modelo entre a Chl-a e a IVF através dos métodos de estimativa instantâneo e da média no Lago Grande do Curuai.....	52
Figura 4.7 - Análise de regressão entre a IVF e a razão de componentes da água no lago Grande do Curuai: (a) Feofitina/Chl-a; (b) Chl-a/COD; (c) Chl-a/TSS; (d) COD/TSS. ....	54
Figura 4.8 - Estações amostrais utilizadas sobrepostas a uma composição colorida (R1G4B3) da imagem MODIS adquirida no dia 10/04/2011, no LGC.....	55
Figura 4.9 - Espectro de reflectância <i>in situ</i> dos cinco pontos amostrados no LGC.....	55
Figura 4.10 - Espectro de reflectância <i>in situ</i> dos quatro pontos amostrados no LGC.....	56
Figura 4.11 - Comparação entre os espectros de reflectância das bandas de 1 a 4 reais (a) e simuladas (b) do sensor MODIS para os mesmos pontos. ....	57
Figura 4.12 - Relação entre a concentração de clorofila extraída em laboratório e a razão banda 1/banda4 simuladas (a) e real (b) das imagens MODIS. ....	58
Figura 4.13 - Resposta espectral das bandas (1 a 4) coletadas a partir da imagem do sensor MODIS, nos pontos distribuídos ao longo do LGC. ....	58
Figura 4.14 - Modelo de regressão entre a razão banda1/banda4 da imagem MODIS e a Chl-a dos pixels correspondentes.....	59
Figura 4.15 - Ajuste ente a Chl-a IVF e a razão de bandas banda1/banda4 dos pixels analisados. ....	60
Figura 4.16 – Classificação pixel a pixel da imagem MODIS no LGC e distribuição das classes. ....	61

Figura 4.17 - Classes de massas d'água opticamente homogêneas na região de maior concentração de clorofila no LGC. A classe 1 (vermelha) corresponde aos locais com grande presença de florações de alga na camada mais superficial da coluna d'água, representadas pelas fotos em destaque. A classe 2 (Verde) refere-se à áreas de transição.....	62
Figura 4.18 - Ajuste entre a razão banda1/banda4 e os valores brutos de Chl-a IVF (a) e médios (b) para os pixels da classe 1.....	63
Figura 4.19 - Ajuste entre a razão banda1/banda4 e os valores brutos de Chl-a IVF (a) e médios (b) para os pixels da classe 2.....	63
Figura B.1 - Modelo de regressão relacionando TSS e turbidez.....	79



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Estatística descritiva do TSS, Chl-a e COD amostrados nas campanhas de campo entre 2003 e 2004.....	27
Tabela 3.2 - Desenho amostral dos transectos amostrados na planície do LGC. ....	36
Tabela 3.3 - Bandas espectrais (1 a 16) do sensor MODIS e suas principais aplicações.....	38
Tabela 4.1 - Estatística descritiva dos parâmetros amostrados durante a campanha de campo na planície de inundação de Curuai. ....	46
Tabela 4.2 - Estatística descritiva dos parâmetros amostrados durante a campanha de campo no lago Poçã. ....	48
Tabela 4.3 - Estatística descritiva dos parâmetros amostrados durante a campanha de campo no lago Guariba. ....	51
Tabela 4.4 - Estatística descritiva dos parâmetros amostrados durante a campanha de campo no lago Grande do Curuai. ....	53
Tabela 4.5 - Localização e intensidade das feições espectrais de absorção e espalhamento da clorofila na água e as respectivas Chl-a.....	56



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Chl-a	Concentração de clorofila-a
Chl-a IVF	Concentração de clorofila-a estimada através da fluorescência
Chl-a Lab	Concentração de clorofila-a extraída em laboratório
COAs	Constituintes opticamente ativos
CID	Carbono inorgânico dissolvido
COD	Carbono orgânico dissolvido
CTD	Carbono total dissolvido
IVF	Fluorescência <i>in vivo</i>
LGC	Lago Grande do Curuai
MERIS	<i>ME</i> dium <i>R</i> esolution <i>I</i> maging <i>S</i> pectrometer
MODIS	<i>MO</i> Derate <i>R</i> esolution <i>I</i> maging <i>S</i> pectroradiometer
NASA	<i>N</i> ational <i>A</i> eronautics and <i>S</i> pace <i>A</i> dministration
REM	Radiação eletromagnética
TSS	Total de sólidos em suspensão



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO ..... 1</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ..... 5</b>
2.1.	Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ambientes aquáticos..... 5
2.2.	Propriedades ópticas da água ..... 7
2.2.1.	Propriedades ópticas inerentes ..... 8
2.2.2.	Propriedades ópticas aparentes ..... 8
2.3.	Comportamento espectral da água..... 9
2.3.1.	Matéria orgânica dissolvida ..... 10
2.3.2.	Partículas em suspensão ..... 10
2.3.3.	Fitoplâncton ..... 11
2.4.	Mapeamento de florações de algas..... 12
2.5.	Espectroscopia de fluorescência ..... 16
2.5.1.	Fatores que afetam a fluorescência da clorofila na água ..... 17
2.5.1.1.	Irradiação solar e temperatura..... 17
2.5.1.2.	Clorofila- <i>b</i> e feopigmentos..... 18
2.5.1.3.	Partículas em suspensão ..... 19
2.5.1.4.	Matéria orgânica dissolvida ..... 20
2.5.2.	Princípio de funcionamento de um fluorômetro ..... 20
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS ..... 25</b>
3.1.	Área de estudo ..... 25
3.2.	Métodos..... 29
3.2.1.	Aquisição dos dados..... 30
3.2.1.1.	Dados limnológicos..... 32
3.2.1.2.	Dados espectrais ..... 33
3.2.1.3.	Dados fluorométricos..... 34
3.2.1.4.	Dados orbitais..... 37
3.2.2.	Análise da fluorescência..... 39
3.2.3.	Estimativa da concentração de clorofila por sensoriamento remoto.... 41

3.2.3.1. Modelo 1: Espectros x Chl-a Lab.....	42
3.2.3.2. Modelo 2: Bandas simuladas x Chl-a Lab .....	43
3.2.3.3. Modelo 3: MODIS x Chl-a Lab.....	43
3.2.3.4. Modelo 4: MODIS x Chl-a IVF .....	43
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
4.1. Análise da fluorescência.....	45
4.1.1. Lago Poção .....	47
4.1.2. Lago Guariba .....	50
4.1.3. Lago Grande do Curuai .....	52
4.2. Estimativa da concentração de clorofila por sensoriamento remoto....	54
4.2.1. Modelo 1: Espectros x Chl-a Lab.....	55
4.2.2. Modelo 2: Bandas simuladas x Chl-a Lab .....	56
4.2.3. Modelo 3: MODIS x Chl-a Lab.....	58
4.2.4. Modelo 4: MODIS x Chl-a IVF .....	60
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A – GRÁFICOS COM AS FUNÇÕES DE RESPOSTA</b>	
<b>ESPECTRAL (BANDAS 1 A 4) DO SENSOR MODIS. ....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE B – VARIÁVEIS AMOSTRADAS NA CAMPANHA DE CAMPO .</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural renovável essencial para a manutenção da vida na Terra. Além de sua importância para os processos ecológicos e ambientais, historicamente a água sempre foi fator determinante para o desenvolvimento (cultural, econômico e social) das civilizações. Entretanto, o aumento da população humana no planeta, juntamente com o elevado grau de urbanização, trazem consequências que afetam a qualidade e a quantidade de água disponível. A diversificação dos usos múltiplos, o despejo de resíduos sólidos e líquidos em rios, lagos e represas e a destruição de áreas alagadas e matas ciliares produzem grandes danos à qualidade da água dos sistemas aquáticos continentais (TUNDISI, 2005).

A eutrofização dos ecossistemas aquáticos continentais é o resultado do enriquecimento da água com nutrientes, principalmente o fósforo e o nitrogênio, os quais favorecem a ocorrência de florações de algas e o desenvolvimento não controlado de plantas aquáticas, especialmente as macrófitas (TUNDISI, 2005). As populações de algas dos sistemas aquáticos continentais podem representar riscos à saúde humana, tendo em vista a produção de potentes toxinas por determinadas espécies. Além disso, a presença de comunidades fitoplanctônicas produz alterações na cor da água, passíveis de serem detectadas por sensores a bordo de aeronaves ou satélites. Os estudos destes ambientes requerem, entretanto, sistemas sensores com boa resolução radiométrica e espectral, sobretudo na faixa do visível, tendo em vista que nesta região estão as feições espectrais diagnósticas dos elementos presentes na água.

O monitoramento da distribuição espacial do fitoplâncton por meio de sensoriamento remoto permite avaliar o estado trófico do ambiente aquático, auxiliando no planejamento e tomada de decisão em situações emergenciais de florações de algas. Um indicador frequentemente utilizado para quantificar a biomassa de fitoplâncton em corpos d'água é a concentração de clorofila-a

(Chl-*a*), a qual é medida com base em amostras em campo e posterior análise laboratorial (método analítico). Embora os métodos analíticos sejam mais precisos, são procedimentos demorados e com alto custo embutido, o que implica na limitação de pontos amostrais nas redes de monitoramento. A rede de monitoramento mais eficiente do Brasil, por exemplo, é mantida pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Composta por 344 estações amostrais, a rede apresenta média de uma estação a cada 720 km<sup>2</sup> no estado (CETESB, 2011). Estas dificuldades implicam na demanda por métodos de amostragem mais baratos, tal como a estimativa da Chl-*a* a partir da fluorescência *in vivo* (IVF) e dos diversos algoritmos que utilizam os valores de reflectância de imagens de sensores remotos (HUNTER et al., 2010; LORENZEN, 1966).

Ao contrário dos ambientes oceânicos onde, com exceção de regiões costeiras, existe baixa quantidade de material particulado em suspensão, os ambientes aquáticos continentais estão sujeitos a grande complexidade no tocante à determinação da Chl-*a* via sensoriamento remoto (GITELSON et al., 2007). A presença de materiais orgânicos e inorgânicos em suspensão pode mascarar a resposta do fitoplâncton presente no corpo d'água, dificultando a estimativa da Chl-*a* por meio de imagens de sensores remotos, e interferindo também na estimativa via fluorometria. Os ambientes aquáticos opticamente complexos são muito frequentes na Bacia Amazônica, onde a evolução geomorfológica levou à formação de extensas planícies de inundação. Estas regiões atuam como uma interface entre o sistema aquático e o terrestre, favorecendo a existência de grande diversidade biogeoquímica da água (JUNK, 2002).

Barbosa (2005) estudou a dinâmica da água e seus constituintes na planície de inundação amazônica de Curuai-PA, caracterizando a distribuição espacial das variáveis de qualidade de água ao longo de um ano hidrológico completo. O autor constatou que além da existência de altos valores de Chl-*a* ao longo do ano, a presença dos sedimentos em suspensão é mais elevada nos períodos

de enchente e seca. Dessa forma, considera-se um grande desafio realizar estimativas da Chl-a na água através de métodos ópticos nestes períodos.

Diante do exposto, este trabalho testa a hipótese de que é possível quantificar a Chl-a em ambientes aquáticos tropicais mesmo em situações nas quais ocorra o predomínio de partículas inorgânicas em suspensão, tal como se configura a planície de inundação amazônica de Curuai-PA no estado da enchente. Esta hipótese baseia-se no fato de que a presença do fitoplâncton implica em alterações na cor da água registrada pelos sensores orbitais, perceptíveis mesmo em presença de sedimentos (LOBO et al., 2011). Sendo assim, o objetivo deste estudo foi desenvolver um método para a estimativa da Chl-a em um ambiente aquático continental opticamente complexo, utilizando dados limnológicos, fluorométricos e espectrais. Para atingir este objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o método de fluorescência *in vivo* para a estimativa da Chl-a em lagos da planície de Curuai-PA;
- Analisar como os constituintes opticamente ativos da água interferem nas medidas de fluorescência *in vivo* da clorofila-a;
- Verificar a possibilidade de utilização de modelos para a estimativa da Chl-a na água através dos valores radiométricos obtidos *in situ* e pela imagem do sensor orbital MODIS.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica, na qual são abordados os conceitos relativos ao sensoriamento remoto para o estudo dos ambientes aquáticos, às propriedades ópticas e ao comportamento espectral da água, bem como à espectroscopia de fluorescência. No Capítulo 3, são descritos os materiais e métodos utilizados. Primeiramente é apresentada uma descrição da área de estudo, seguida do detalhamento da campanha de campo e dos procedimentos de extração de dados utilizados. Também são detalhadas as

etapas de análise de fluorescência e estimativa da Chl-*a* por sensoriamento remoto. Os resultados e discussões dos modelos de conversão de fluorescência em Chl-*a* e da estimativa da clorofila através dos dados espectrais *in situ* e da imagem MODIS estão descritos no Capítulo 4. O quinto e último capítulo apresenta as conclusões e recomendações fundamentadas nas análises realizadas ao longo da pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ambientes aquáticos

O sensoriamento remoto aplicado ao estudo de ambientes aquáticos busca extrair informações sobre os parâmetros de qualidade de água a partir da análise dos registros, em imagens e gráficos, do sinal resultante das interações entre a energia eletromagnética incidente e o corpo d'água. Nesse contexto, quando a radiação eletromagnética (REM) penetra num corpo d'água ocorrem dois importantes processos: absorção e espalhamento (KIRK, 1994). A magnitude com que ocorrem estes dois processos está intimamente relacionada com a composição da coluna d'água. A Figura 2.1 apresenta um esquema detalhado sobre a interação entre a REM com um corpo d'água.

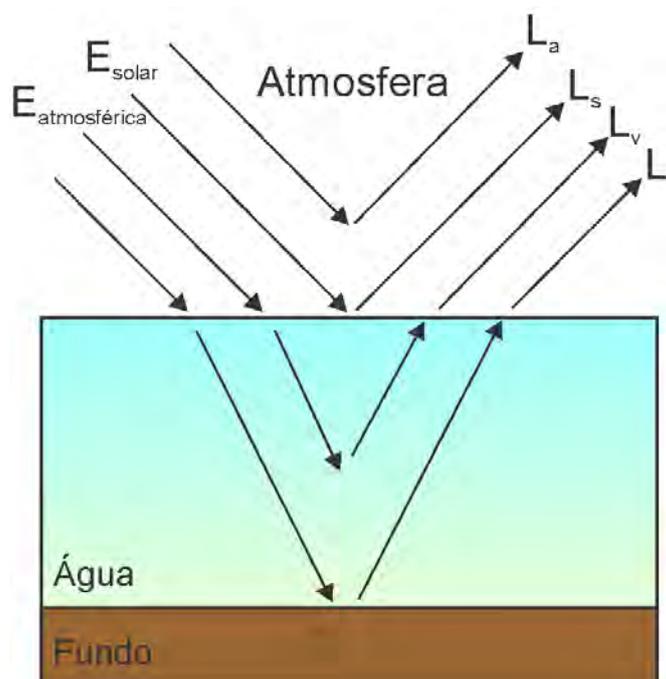


Figura 2.1- Representação da interação da REM com um corpo d'água. O corpo d'água recebe a irradiância do Sol ( $E_{solar}$ ) e da atmosfera ( $E_{atmosférica}$ ), que após interagir com o alvo é registrada pelo sensor. Este sinal registrado é composto pelo retroespalhamento atmosférico ( $L_a$ ) e pelas radiancias da superfície da água ( $L_s$ ), volumétrica de subsuperfície ( $L_v$ ) e de fundo ( $L_f$ ).

Fonte: Adaptada de Jensen (2009).

Conforme descrito por Jensen (2009), em ambientes aquáticos a radiância total ( $L_t$ ) registrada pelo sensor é composta pela energia eletromagnética proveniente de quatro fontes (Figura 2.1):

$$L_t = L_a + L_s + L_v + L_f$$

onde:

$L_a$  é a fração da radiação solar difusa que retorna em direção ao sensor após interagir com a atmosfera, sem interagir com a água;

$L_s$  é o retroespalhamento causado pelas moléculas da superfície da água, podendo causar reflexão especular (*glitter*) em função da geometria sensor-alvo-fonte;

$L_v$  é a componente que penetra na água, interage com suas moléculas e constituintes opticamente ativos e é retroespalhada na direção do sensor, sem interagir com o fundo;

$L_f$  é a porção da radiância que atravessa a coluna d'água e alcança o fundo, retornando em seguida para o sensor (depende da transparência e/ou da profundidade do corpo d'água).

A água é um alvo que possui como característica forte absorção da REM na região do infravermelho próximo e médio, e baixa reflectância na região do visível em função de suas características físico-químicas. Na faixa do visível, apesar do coeficiente de absorção ser muito pequeno, a transmitância da água é alta, favorecendo o espalhamento da luz na direção frontal. Na prática, este não é um fator que impede os estudos de qualidade da água via sensoriamento remoto, mas impõe algumas restrições importantes. A principal delas diz respeito à faixa espectral útil, localizada entre 400 e 700 nm (Figura 2.2). Este intervalo está entre uma região de baixa irradiância solar na superfície

terrestre, abaixo de 400 nm, e outra região de forte absorção da energia eletromagnética pela própria água, acima de 700 nm (DEKKER, 1993). Como esta faixa útil está compreendida pela região visível do espectro eletromagnético, as propriedades da água em relação à interação com a radiação são denominadas propriedades ópticas da água.

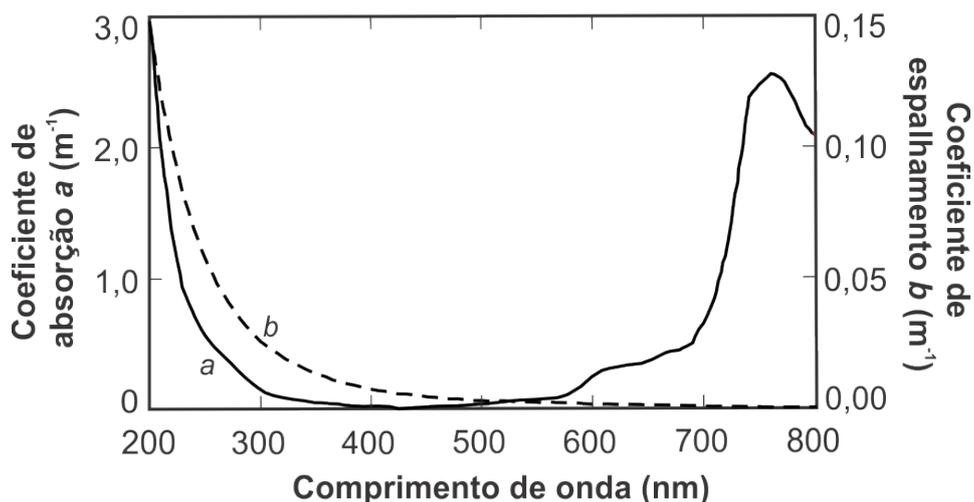


Figura 2.2 - Espectro de absorção (a) e espalhamento (b) da água natural oceânica. Fonte: Adaptada de Mobley (1994).

## 2.2. Propriedades ópticas da água

Dois conjuntos de propriedades ópticas podem ser definidos para o meio aquático: propriedades ópticas inerentes e propriedades ópticas aparentes. Estas propriedades estão relacionadas tanto à interação da REM com a água quanto com os constituintes opticamente ativos (COAs) presentes na coluna d'água. Os COAs são os diversos elementos presentes na água que ao interagir com a REM, produzem alteração no campo de luz incidente. Em geral, os COAs são formados por organismos vivos aquáticos, partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão e pela matéria orgânica dissolvida (KIRK, 1994). O conhecimento das propriedades ópticas da água natural (água pura e os COAs) é fundamental, pois fornece subsídios para a análise dos resultados obtidos pelos métodos de extração de informação por meio do sensoriamento remoto.

### **2.2.1. Propriedades ópticas inerentes**

Ao penetrar na água, a REM incidente pode ser absorvida ou espalhada. A fração absorvida é transformada em energia química através da fotossíntese ou em energia térmica, de acordo com os componentes ali presentes. Já o fluxo de energia retroespalhada, ou espalhada na direção ascendente, sofre influência tanto das moléculas da água quanto de alguns dos constituintes nela presentes, apresentando comportamento específico para cada comprimento de onda (BARBOSA, 2005). Sendo assim, é possível inferir sobre a composição da água a partir da análise dos processos de absorção e espalhamento. Para isto, torna-se necessária a quantificação destes processos através do estabelecimento de coeficientes de absorção e espalhamento.

Os coeficientes de absorção, espalhamento e a função de espalhamento volumétrico são denominados de propriedades ópticas inerentes da água. Estas propriedades, que são propriedades físicas do meio aquático, não dependem de fatores externos, tal como a variação na geometria do fluxo de energia incidente, mas da composição e concentração das substâncias presentes na água (KIRK, 1994).

### **2.2.2. Propriedades ópticas aparentes**

São definidas como propriedades ópticas aparentes aquelas cuja grandeza é influenciada não apenas pelas substâncias que compõem o meio aquático, mas também pelo campo de luz incidente. São exemplos de propriedades ópticas aparentes o coeficiente de atenuação difusa, a reflectância irradiância ou razão de irradiância e a reflectância de sensoriamento remoto (MOBLEY, 1994). O primeiro representa a taxa de decréscimo da irradiância descendente em função do aumento da profundidade. Já a reflectância irradiância é um parâmetro que relaciona as propriedades da água com a razão entre a irradiância ascendente pela irradiância descendente. A reflectância de sensoriamento remoto é a razão entre a radiância ascendente na direção do

sensor e a irradiância descendente (BARBOSA, 2005; KIRK, 1994; MOBLEY, 1994)

### 2.3. Comportamento espectral da água

O comportamento espectral de um alvo pode ser entendido como a medida de sua reflectância em faixas espectrais adjacentes e estreitas ao longo da região reflexiva do espectro eletromagnético. Este comportamento pode variar em função das características intrínsecas do alvo e das condições de observação e iluminação (NOVO, 2008). Conforme apresentado pela Figura 2.3, a água limpa é um alvo que apresenta baixa reflectância na região visível do espectro eletromagnético quando comparada aos demais alvos da superfície terrestre, devido ao pequeno coeficiente de espalhamento e alta transmitância. Porém, a presença dos COAs na água provoca mudanças específicas em seu comportamento espectral, variando de acordo com a concentração e mistura destes constituintes.

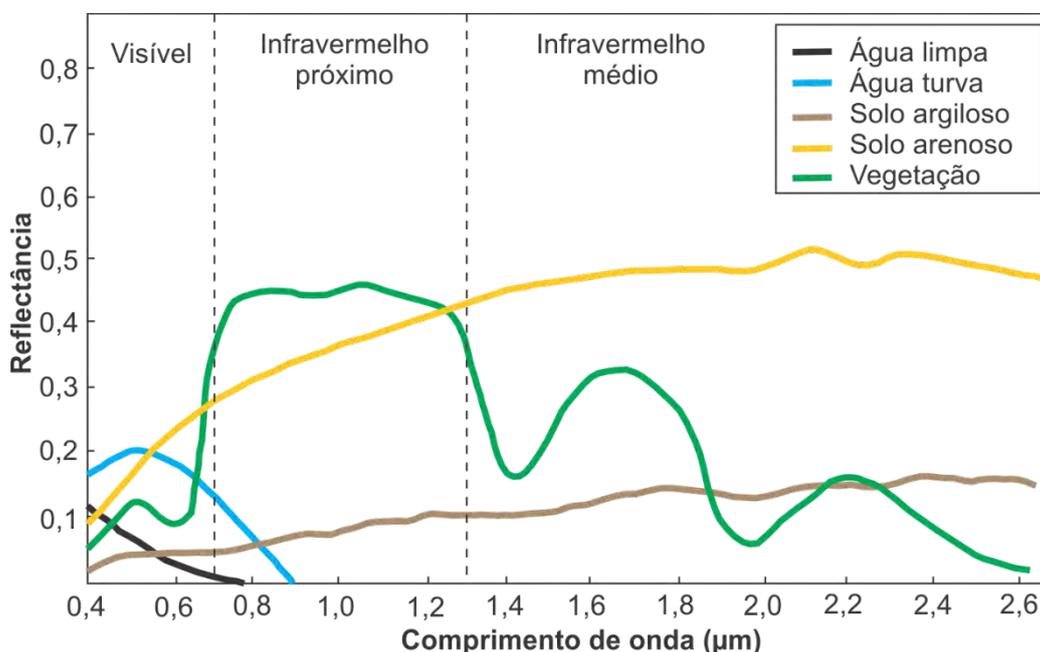


Figura 2.3 - Comportamento espectral da vegetação, água (limpa e turva) e solo (arenoso e argiloso).  
Fonte: Florenzano (2002).

### **2.3.1. Matéria orgânica dissolvida**

Segundo Tundisi e Tundisi (2008), as substâncias orgânicas dissolvidas na água possuem origem diversificada e apresentam papel fundamental nos sistemas aquáticos, sendo compostas principalmente pelas substâncias húmicas (substâncias orgânicas biogênicas). O carbono orgânico dissolvido (COD) é um importante parâmetro de quantificação da presença de substâncias orgânicas nos sistemas aquáticos. O comportamento espectral da água com matéria orgânica dissolvida foi estudado por diversos autores, dentre os quais Bukata (1983), Mantovani e Novo (1996) e Witte et al. (1982). As principais características espectrais desses ambientes são: i) elevado coeficiente de absorção da luz na região do azul (400 a 500 nm), que reduz exponencialmente no sentido dos comprimentos de onda mais longos; ii) redução substancial da reflectância na região do visível com o aumento da concentração de matéria orgânica dissolvida; e iii) aumento da reflectância na região do infravermelho próximo com o aumento da concentração de matéria orgânica dissolvida.

### **2.3.2. Partículas em suspensão**

Diferentes quantidades e tipos de partículas em suspensão interferem na transparência da água, sendo este um importante fator a ser considerado nos estudos de avaliação do estado trófico dos corpos hídricos. As partículas em suspensão possuem um peso relevante no fornecimento de nutrientes e interferem diretamente na disponibilidade de luz nos corpos d'água. Estas condições podem determinar ou limitar processos de eutrofização. A composição das partículas em suspensão determinam também alterações nos processos de absorção e espalhamento da REM, provocando alterações no comportamento espectral da água.

Goodin et al. (1993) e Lodhi et al. (1997) identificaram as principais características espectrais de águas ricas em partículas inorgânicas em suspensão (Figura 2.4): i) baixa reflectância na região entre 400 e 500 nm; ii)

patamar de maior reflectância na região do amarelo/vermelho, entre 580 e 700 nm, em função do espalhamento pelas partículas; iii) mínimo de reflectância em torno de 720 nm; e iv) leve aumento da reflectância por volta de 820 nm.

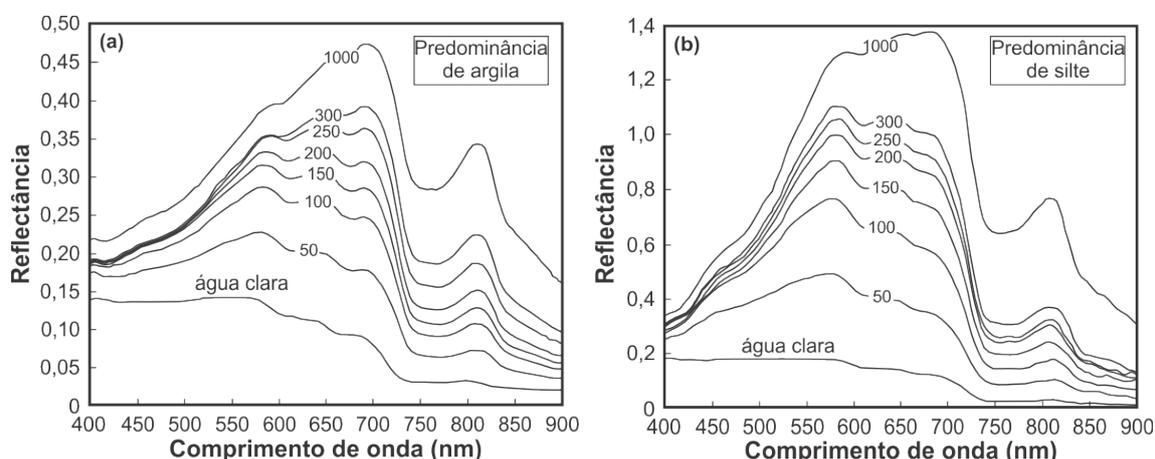


Figura 2.4 - Comportamento espectral da água com diferentes concentrações de partículas em suspensão, expressas em  $\text{mg.L}^{-1}$ , onde (a) apresenta amostras com predominância de argila e (b) amostras com predominância de silte.

Fonte: Adaptada de Lodhi et al. (1997).

### 2.3.3. Fitoplâncton

Considerando que a clorofila-a é o pigmento dominante nos diversos gêneros de fitoplâncton existentes, sua concentração é adotada como representativa da biomassa fitoplanctônica em corpos d'água. As curvas espectrais apresentadas pela Figura 2.5 mostram o efeito da presença do fitoplâncton em corpos d'água com diferentes concentrações de clorofila. Dentre as feições diagnósticas características (ARST, 2003; GITELSON, 1992; RUNDQUIST et al., 1996; VASILKOV e KOPELEVICH, 1982), destacam-se: i) baixa reflectância na faixa de 400 a 500 nm, em função da forte absorção da luz pelos pigmentos; ii) máximo de reflectância na região do verde, em torno de 550 nm; iii) mínimo de reflectância em torno de 630 nm, em função da absorção pelas ficobiliproteínas (pigmentos acessórios presentes em cianobactérias); iv) mínimo de reflectância em torno de 665-675 nm,; e v) máximo de reflectância em torno de 715 nm, atribuído ao alto espalhamento e absorção mínima pela presença de COAs.

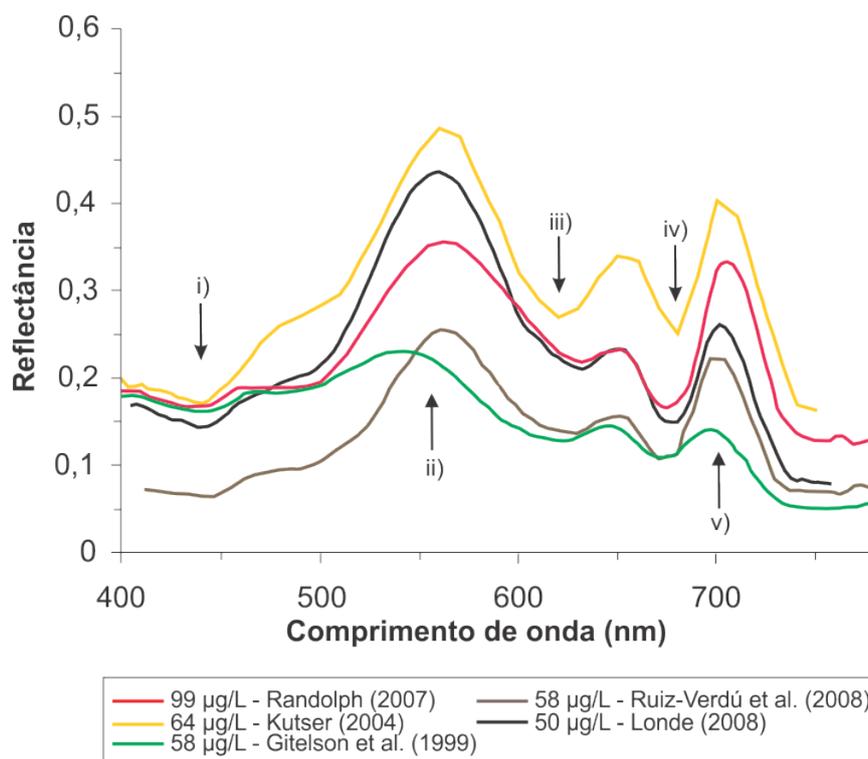


Figura 2.5 - Comportamento espectral da água com diferentes concentrações de Chl-a. Fonte: Adaptada de Lobo et al. (2009).

#### 2.4. Mapeamento de florações de algas

O mapeamento de florações de algas em ecossistemas aquáticos continentais através de sensores ópticos pode ser dificultado de acordo com a composição da água. Morel e Prieur (1977) estudaram diversos tipos de água e estabeleceram uma divisão em duas classes em função da concentração dos COAs (Figura 2.6). Denominam-se águas do Caso 1 quando possuírem a clorofila e seus produtos de degradação como COA dominante. Nestas águas os COAs se correlacionam linearmente com a quantidade de clorofila. Já nas águas do Caso 2, as partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão, juntamente com a matéria orgânica dissolvida, podem mascarar as feições de absorção e espalhamento da clorofila. Diante destas características as águas do Caso 2 são também denominadas de águas opticamente complexas. De maneira geral, pode-se afirmar que as águas do Caso 1 estão associadas à

ambientes oceânicos, enquanto as do Caso 2 às águas costeiras e continentais ou interiores.



Figura 2.6 – Classificação dos tipos de água em função da concentração dos COAs.  
Fonte: Adaptada de Sathyendranath (2000).

Ambientes caracterizados por águas do Caso 1 podem ter a Chl-*a* estimada com base em algoritmos simples, que utilizam a razão das bandas azul e verde do espectro eletromagnético. Porém, existe maior dificuldade para quantificar a clorofila em águas do Caso 2 por meio de tais modelos, devido à complexidade óptica destas águas (LE et al., 2009). Apesar dessas dificuldades, diversos autores propuseram o uso de razões de bandas na região do vermelho e infravermelho próximo (GITELSON et al., 2008, KUTSER, 2009; MOREL e PRIEUR, 1977) como alternativa para contornar o efeito da absorção pela matéria orgânica dissolvida na região do azul, responsável pela superestimativa da concentração de clorofila.

Gitelson et al. (2008) destacaram que apesar de existir uma gama de algoritmos para estimativa de clorofila em águas do Caso 2, todos estão baseados nas propriedades do pico de refletância próximo dos 700 nm. Esta região do espectro eletromagnético, muito utilizada para estudos de vegetação, também é adequada para estudos de Chl-*a* em ambientes aquáticos, pois

realça a presença das florações de algas. Sendo assim, é preferível a utilização de algoritmos espectrais que trabalhem com a razão entre o pico de refletância do infravermelho próximo e a banda de absorção pela clorofila localizada na região do vermelho (i.e. algoritmos *NIR-Red*).

Diversos estudos têm realizado o mapeamento da Chl-*a* com resultados significantes por meio do sensoriamento remoto. Testes preliminares realizados por Ferreira et al. (2011) mostraram a boa capacidade da utilização do sensor hiperespectral aerotransportado SpecTIR na distinção de diferentes concentrações de clorofila-*a* em um reservatório eutrofizado situado no interior do estado de São Paulo. Brando e Dekker (2003), Giardino et al. (2007) e Rudorff et al. (2009) utilizaram dados do sensor orbital Hyperion/EO-1 para estimar concentrações de COAs de águas costeiras e continentais, inclusive na bacia amazônica. Entretanto, a utilização de produtos derivados destes sensores ainda possui diversas limitações. As imagens hiperespectrais com boa relação sinal-ruído geralmente são adquiridas por sensores aerotransportados, que possuem estreita largura da faixa de imageamento. Já os sensores hiperespectrais a bordo de satélites apresentam baixa relação sinal-ruído ou mesmo operam sob demanda, ou seja, dependem de uma solicitação específica para o imageamento de determinadas áreas e datas. A promessa do surgimento de sensores hiperespectrais orbitais com bons níveis de relação sinal-ruído nos próximos anos, dentre eles os sensores HypSPRI e EnMAP, permitirá a aquisição de dados sistemáticos e com maior largura de faixa imageada. Estas características irão possibilitar a utilização em larga escala destes sensores para os estudos de ambientes aquáticos continentais.

Uma alternativa muito interessante para o mapeamento da Chl-*a* é a utilização do sensor multiespectral MERIS, a bordo do satélite Envisat. Kutser (2009) afirma que atualmente este é o único sensor orbital multiespectral com especificações que permitem mapear a Chl-*a* com base no pico de reflectância em 700 nm. Recentemente, bons resultados na aplicação de imagens MERIS

para a estimativa e mapeamento da Chl-a em água continentais e costeiras foram obtidos por Matthews et al. (2010), Moses et al. (2009), Odermatt et al. (2010) e Shen et al. (2010). Apesar de suas boas características, o sensor MERIS não apresenta recobrimento contínuo da superfície terrestre, sendo necessária a programação de aquisição antecipada, cuja execução depende de fatores fora do controle dos usuários. Este fato torna o sensor MERIS inadequado para monitoramento dos corpos d'água.

Outra possibilidade é a utilização do sensor MODIS, instalado a bordo das plataformas Terra e Aqua, operadas pela Agência Espacial Norte Americana (NASA). O MODIS é um instrumento que possibilita a realização de estimativas da Chl-a, embora com algumas limitações. As bandas com melhor resolução espectral possuem baixa resolução espacial, tornando-se mais favoráveis aos estudos oceânicos em detrimento das águas interiores. Uma série de estudos vem utilizando o potencial do sensor MODIS para monitorar e quantificar a biomassa fitoplanctônica em ambientes aquáticos continentais. Gurlin et al. (2011) realizaram medidas espectrais *in situ* para simular as bandas dos sensores MERIS e MODIS, e então estimar a Chl-a em lagos no Nebraska, EUA. Foram gerados modelos passíveis de explicar até 75% da Chl-a para bandas do sensor MODIS e 95% para as bandas do sensor MERIS. Novo et al. (2006) aplicaram a técnica de modelo linear de mistura espectral (MLME) sobre imagens MODIS para avaliar as mudanças sazonais na distribuição de clorofila na região da planície de inundação de Curuai, baixo Amazonas. Foi obtido como resultado um modelo empírico com  $R^2 = 0,76$ , entre a Chl-a e os valores digitais resultantes da fração de fitoplâncton do MLME. Moses et al. (2009) avaliaram a utilização dos dados MODIS e MERIS na estimativa da Chl-a em águas do Caso 2. O trabalho destaca as limitações e desafios desse tipo de análise quanto a influência da correção atmosférica, variabilidade temporal dos parâmetros de qualidade da água e heterogeneidade espacial da Chl-a dentro do pixel da imagem.

## 2.5. Espectroscopia de fluorescência

Espectroscopia de fluorescência (fluorometria) é o conjunto de técnicas de análise empregadas sobre a propriedade de fluorescência dos corpos. Segundo Suggett et al. (2010), a fluorescência de um corpo pode ser entendida como a capacidade do mesmo em reemitir fótons em ondas longas ao recebê-los em ondas curtas. A energia absorvida por um corpo provoca a excitação de elétrons nas moléculas as quais, ao retornarem para seu estado fundamental, reemitem parte da energia como fluorescência. A quantidade de energia reemitida, entretanto, é muito menor do que a inicialmente absorvida. Estas moléculas expositoras de fluorescência geralmente possuem comprimentos de ondas específicos de maior excitação e fluorescência (TUNZI et al., 1974). No caso da clorofila-a, a energia é absorvida em comprimento de ondas menores do que 675 nm e a reemissão ocorre por volta de 685 nm (SUGGETT et al., 2010; YENTSCH e PHINNEY, 1985), conforme apresentado pela Figura 2.7.

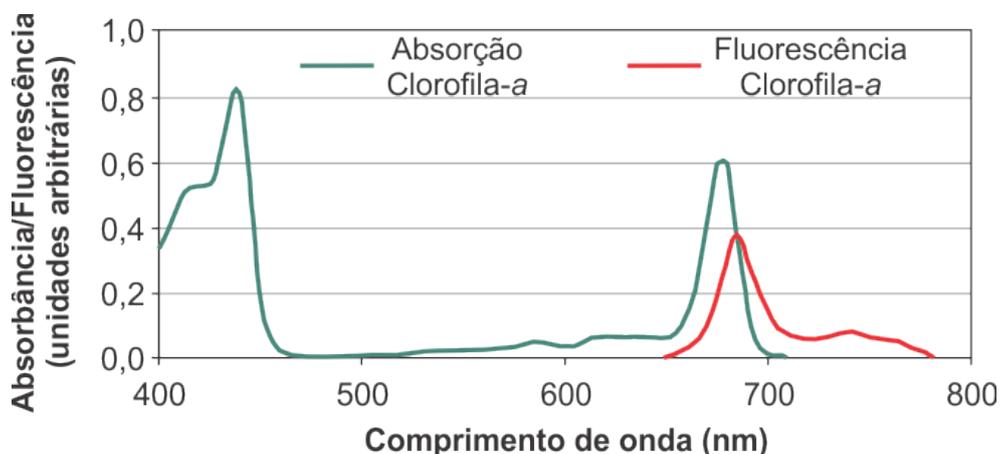


Figura 2.7 - Espectro de absorção e fluorescência da clorofila-a.  
Fonte: Adaptada de Papagiourgiou e Govindjee (2004).

A fluorimetria possui grande potencial para estimar a biomassa fitoplanctônica nos ambientes aquáticos, pois as medidas da IVF podem ser facilmente correlacionadas com a Chl-a em corpos d'água (GOWER, 1999). Além de ser um método rápido e simples (VYHNÁLEK et al., 1993), a utilização de um fluorômetro em campo auxilia na logística dos estudos de qualidade da água,

pois reduz o número de amostras a serem coletadas e diminui, assim, os custos com análises laboratoriais (TURNER DESIGNS, 2008a). Apesar de suas vantagens, a estimativa da concentração de clorofila na água por meio da espectroscopia de fluorescência possui algumas limitações e demanda alguns cuidados, principalmente para águas interiores. Para uma mesma concentração de clorofila, a fluorescência pode sofrer influência das características fisiológicas das algas e ópticas do ambiente analisado. O subitem 2.5.1 apresenta uma breve discussão sobre estes fatores.

### **2.5.1. Fatores que afetam a fluorescência da clorofila na água**

Basicamente, a fluorescência da clorofila na água sofre influência tanto das variações no rendimento quântico de fluorescência, quanto da fluorescência solúvel (*soluble fluorescence*). O rendimento quântico de fluorescência é descrito como a razão entre os fótons emitidos e absorvidos. Esta razão depende de uma série de fatores fisiológicos e ambientais, dentre eles: i) irradiação solar (ABBOTT et al., 1982; HEANEY, 1978; KIEFER, 1973a,b); ii) espécies de fitoplâncton (HEANEY, 1978; KELLER e RICE, 1990); iii) estresses nutricionais das algas (BABIN et al., 1996; KIEFER, 1973a); iv) pigmentos acessórios (GIBBS, 1979; WELSCHMEYER, 1994); e temperatura da água (LORENZEN, 1966). Já a fluorescência solúvel trata da fluorescência remanescente na água sendo constituída pela soma dos demais componentes que não a clorofila, ou seja, as partículas em suspensão e a matéria orgânica dissolvida (CARLSON e SHAPIRO, 1981; TUNZI et al., 1974).

#### **2.5.1.1. Irradiação solar e temperatura**

Diversos autores exploraram os efeitos da variação das condições de iluminação na IVF em seus trabalhos. Kiefer (1973b) avaliou os parâmetros ecológicos que controlam a variabilidade da fluorescência do fitoplâncton. O autor mostrou a existência do efeito da foto inibição resultante da exposição do fitoplâncton à variação solar no período de um ciclo diurno (Figura 2.8). Neste mesmo trabalho, o autor realizou testes sobre o comportamento da

fluorescência para situações de tempo nublado. Os resultados demonstraram que nestas situações, o efeito de foto inibição pode não acontecer. Os efeitos da variação da fluorescência ao longo do dia também foi relatado por Heaney (1978), Kiefer (1973a), e Soohoo et al. (1986).

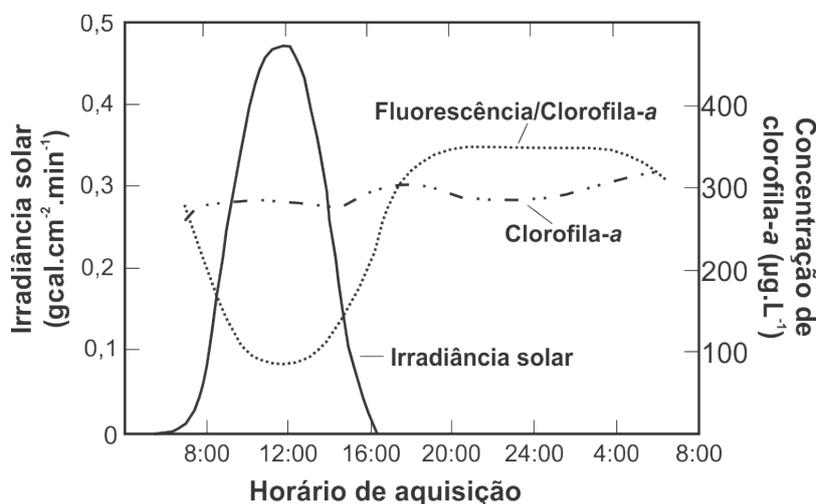


Figura 2.8 – Variações da IVF em função das mudanças de irradiância solar ao longo de um ciclo diurno.

Fonte: Adaptada de Kiefer (1973a).

Com relação à influência da temperatura, cada grau de variação da temperatura da água implica em 1,4% de mudanças na IVF (LORENZEN, 1966). Sendo assim, apesar da existência de um maior cuidado na análise dos resultados de ambientes que apresentem maior gradiente de temperatura da água, este não é um fator que provoca grandes alterações na IVF registrada.

### 2.5.1.2. Clorofila-b e feopigmentos

Welshmeyer (1994) realizou um estudo para analisar a IVF sob a influência da clorofila-b (Chl-b) e feopigmentos. A comparação dos espectros de absorção e fluorescência para diferentes pigmentos é apresentada na Figura 2.9.

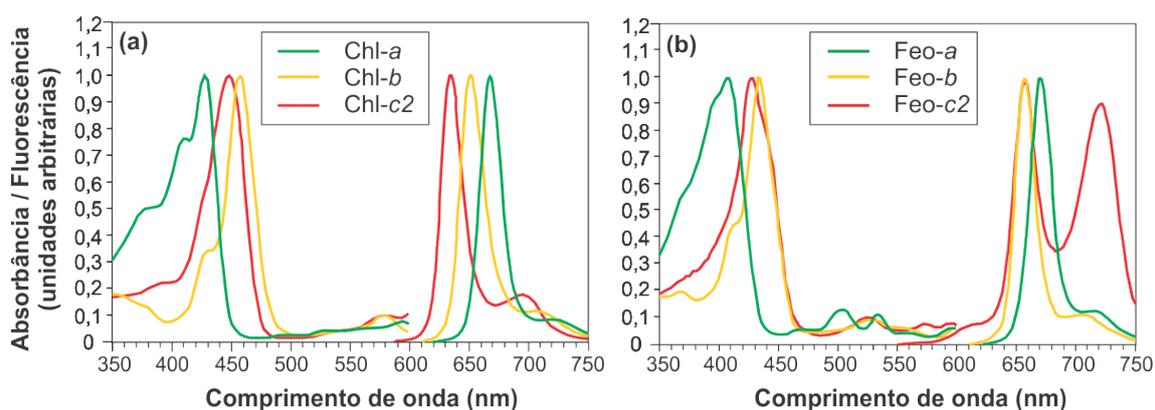


Figura 2.9 – Comparação do espectro de absorção e da fluorescência para: (a) Chl-a, Chl-b, Chl-c2; e (b) feofitina-a, feofitina-b e feofitina-c2.  
 Fonte: Adaptada de Welschmeyer (1994).

Observa-se que apesar da proximidade espectral, existem diferenças nos picos de absorção e fluorescência dos pigmentos, indicando que a quantificação dos elementos é possível desde que se restrinja a região espectral ao pigmento de interesse. No caso da clorofila-a, nota-se que o espectro de fluorescência é distinto em relação aos demais pigmentos, porém muito semelhante ao da feofitina-a. Assim, a utilização de um conjunto óptico (combinação de filtros e lâmpada) adequado é essencial para a utilização da fluorometria como método de estimativa da Chl-a (WELSHMEYER, 1994).

### 2.5.1.3. Partículas em suspensão

A presença de grandes quantidades de partículas em suspensão é um dos principais fatores de perturbação da IVF. Goodin et al. (1993) mostraram que existe um incremento no sinal espectral da água na região do vermelho (600 a 700 nm) quando a turbidez aumenta. Esta região se sobrepõe à faixa espectral de emissão da fluorescência da clorofila. Dessa forma, as variações na concentração dos materiais em suspensão podem não só mascarar o sinal da fluorescência, mas também incrementar o sinal detectado pelo sensor. Lobo et al. (2011) estabeleceram limiares de TSS/Chl-a para a identificação do sinal espectral da clorofila-a em águas Amazônicas. Os autores afirmam que o sinal espectral que indica a presença da clorofila na água só pode ser identificado

sob a presença de sedimentos quando a razão TSS/Chl-a for menor do que 1000.

#### **2.5.1.4. Matéria orgânica dissolvida**

Os primeiros estudos sobre a influência da matéria orgânica dissolvida na IVF foram realizados por Harris (1980). Carlson e Shapiro (1981) também conduziram experimentos para avaliar a influência das substâncias húmicas na análise da IVF em lagos. Os autores destacaram a importância do uso de filtros para restringir a faixa espectral analisada pelos sensores, visando reduzir a interferência de componentes diversos. Witte et al. (1982) relataram a influência das variações do COD nas propriedades ópticas da água. Os resultados do estudo mostraram que a absorção da REM na região espectral do azul (400-500 nm) aumenta quando a concentração do COD aumenta. Portanto, se o filtro de excitação instalado no fluorômetro permitir a passagem de fótons em uma ampla faixa na região do azul, a presença de grandes quantidades de matéria orgânica dissolvida na água pode absorver parte da energia disponível para excitar as moléculas de clorofila, diminuindo assim a fluorescência.

#### **2.5.2. Princípio de funcionamento de um fluorômetro**

Os fluorômetros (fluorímetros), equipamentos destinados à medição da fluorescência a partir de um conjunto óptico, são classificados em dois tipos: espectrofluorômetros, quando emitem e analisam luz em diversos comprimentos de onda; e fluorômetros de filtro quando operam em faixas espectrais específicas. Os fluorômetros podem realizar medidas de amostras discretas e também em fluxo contínuo, quando possuem uma célula de fluxo. A Figura 2.10 apresenta um esquema do funcionamento de um fluorômetro de filtro operando em fluxo contínuo.

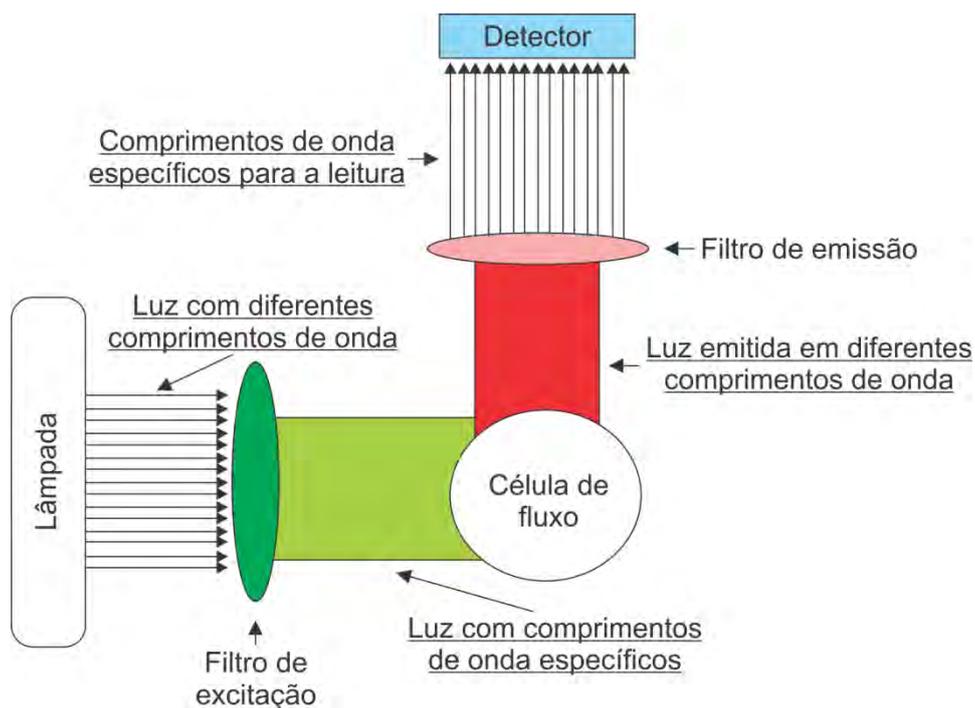


Figura 2.10 - Esquema representativo de um fluorômetro de filtro operando em fluxo contínuo.

Fonte: Adaptada de Turner Designs (2008b).

A partir de uma lâmpada que emite luz em diferentes comprimentos de onda, separam-se regiões espectrais específicas, baseadas no conhecimento prévio das propriedades espectrais do material de interesse. Esta etapa baseia-se na utilização de um filtro de excitação, que seleciona os comprimentos de onda de maior excitação da substância a ser estudada. Em seguida, a luz filtrada interage com o material presente na célula de fluxo, provocando o fenômeno da fluorescência. Apesar da baixa intensidade, a luz é emitida pelo material em diferentes comprimentos de onda, criando a necessidade de utilização de outro filtro. Este segundo filtro atua de forma semelhante ao primeiro, limitando regiões espectrais específicas para a leitura pelo detector.

Os filtros possuem papel fundamental na execução dos procedimentos de fluorimetria, pois limitam a REM aos comprimentos de onda das feições diagnósticas da substância estudada. Apesar dos filtros com largura de banda mais estreitas serem mais específicos e precisos, eles podem não detectar o

sinal espectral quando em ambientes naturais, tendo em vista que nessas condições dificilmente a substância é pura. Welshmeyer (1994) conduziu um experimento no qual foram comparados diferentes conjuntos ópticos em um fluorômetro, na tentativa de reduzir o efeito da Chl-*b* e de pigmentos acessórios (Figura 2.11). Três conjuntos ópticos foram testados: i) um tradicional (F4T5B), composto por uma lâmpada com maior excitação na região espectral do azul, já indisponível comercialmente, um filtro de excitação com largura espectral entre 350-500 nm e um filtro de excitação amplo (>650 nm); ii) um segundo conjunto (F4T5D) com os mesmo filtros utilizados pelo primeiro conjunto óptico, porém com uma lâmpada *Daylight*; e iii) um novo conjunto testado (F4T4) composto por uma lâmpada *Bluelamp* e filtros mais específicos, com largura de bandas restritas a 430-450 nm para o de excitação e 670-700 nm para o de emissão.

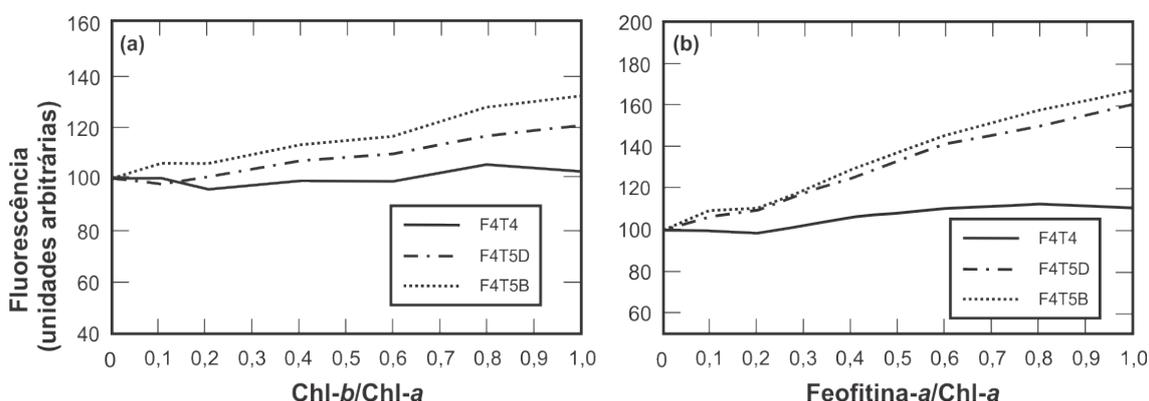


Figura 2.11 – Resposta da fluorescência em função do aumento da concentração de Chl-*b* (a) e feofitina-*a* (b) para diferentes configurações ópticas de um fluorômetro.

Fonte: Adaptada de Welshmeyer (1994).

Com relação à presença da Chl-*b*, nota-se que a utilização dos conjuntos ópticos tradicionais (F4T5B e F4T5D), com maior largura de bandas, apresentou um incremento entre 20% e 30% na fluorescência registrada pelo sensor. Por outro lado, a utilização do conjunto otimizado (F4T4), composto por filtros mais específicos, manteve os valores de IVF praticamente constante

(Figura 2.11 (a)). No caso da influência da feofitina-a (Figura 2.11 (b)), a diferença foi ainda maior com a utilização dos conjuntos ópticos tradicionais (F4T5B e FAT5D), sendo que a IVF aumentou 75% quando a relação feofitina-a/Chl-a = 1, ou seja, quando a comunidade fitoplanctônica caracterizava-se por um avançado estágio de degradação. Já utilizando o fluorômetro operando com filtros específicos (F4T4), a variação da fluorescência foi da ordem de 10%.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

A área de estudo está situada na Bacia Amazônica e compreende a região conhecida como planície do Lago Grande de Curuai (LGC). Localizada a 900 km da foz do Rio Amazonas, a planície do LGC abrange os municípios de Juruti, Óbidos, e Santarém - PA, entre as latitudes 01°50'S e 02°15'S e longitude 55°00'W e 55°55'W (Figura 3.1). Possui extensão de 130 km e é constituída por mais de vinte lagos com diferentes características biogeoquímicas, em função dos tipos de águas que recebem. O LGC é o maior dos lagos com aproximadamente 50 km de extensão. Segundo Barbosa (2005), a planície possui 3500 km<sup>2</sup> de área e pode apresentar até sete metros de variação do nível da água, caracterizando diversos tipos de paisagem ao longo do ano hidrológico.

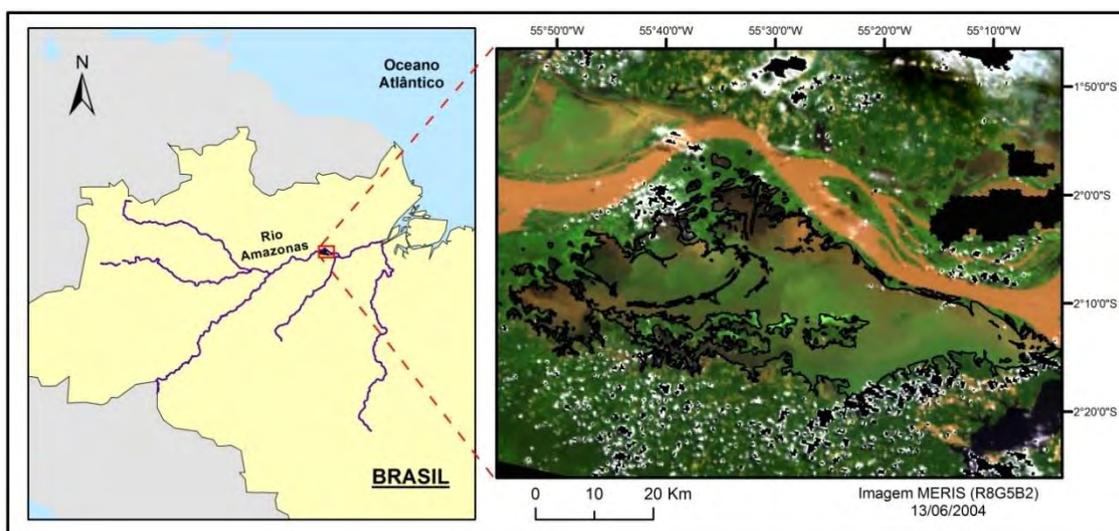


Figura 3.1 – Localização da Planície de Curuai - PA.

A Bacia Amazônica possui diferentes tipos de água característicos. Em função desta diversidade, Sioli (1984) propôs uma classificação em três grupos: águas brancas, pretas e claras. As águas brancas caracterizam-se pela maior quantidade de partículas inorgânicas em suspensão e dissolvidas, pela cor

amarelada e pelo pH praticamente neutro. As águas pretas contêm grande quantidade de componentes húmicos dissolvidos, possuem cor verde/marrom escuro e pH mais ácido. Por fim, as águas claras são transparentes, com baixa quantidade de sedimentos, cor esverdeada e pH variando de ácido à neutro.

O regime pluviométrico, somado às características geomorfológicas da Bacia Amazônica, é o responsável pelo pulso de inundação do rio Amazonas (JUNK, 1997). Segundo Bonnet et al. (2008), a dinâmica biogeoquímica da água na planície do LGC é altamente influenciada pelo pulso de inundação do rio Amazonas. Barbosa (2005) descreve quatro estados fundamentais para os estudos da dinâmica de água na planície de Curuai – PA, em função do pulso de inundação do rio Amazonas (Figura 3.2). Estes estados foram divididos de acordo com o nível da água na planície e o fluxo de massas d'água entre a planície e o rio Amazonas. Foram estabelecidos dois estados onde o nível da água na planície é estável, característicos dos regimes de cheia e seca. Nos outros dois estados, ocorre grande variação no nível da água, um quando o fluxo de água é maior do rio para a planície (enchente) e outro quando o fluxo é maior da planície para o rio (vazante).

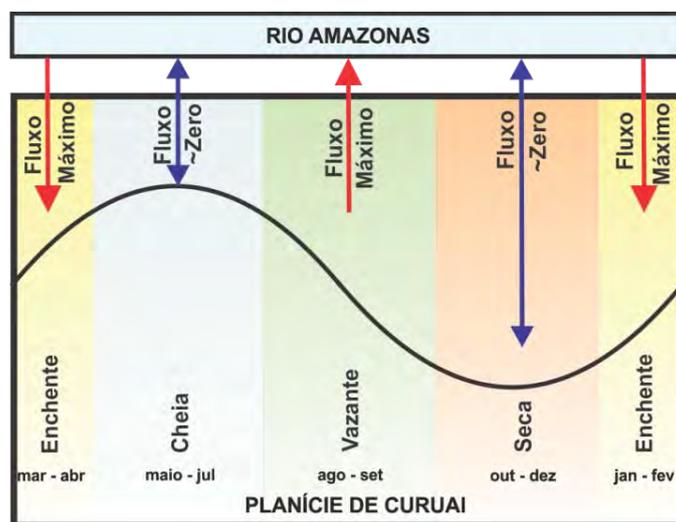


Figura 3.2 – Representação da dinâmica sazonal da água na Planície de Curuai - PA. Fonte: Adaptada de Barbosa (2005).

A Tabela 3.1 apresenta as estatísticas descritivas da Chl-a, total de sólidos em suspensão (TSS) e carbono orgânico dissolvido (COD) para os quatros estados da planície do LGC obtidos em campanhas de campo realizadas entre 2004 e 2005 (Barbosa, 2005). As altas concentrações de TSS e baixas de Chl-a durante o estado da enchente, comparando-as aos demais estados, conferem grande complexidade óptica às águas na região (Figura 3.3).

Tabela 3.1 - Estatísticas descritivas do TSS, Cla-a e COD amostrados nas campanhas de campo entre 2003 e 2004.

Variável	Estado	Amostras	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Coefficiente Variação
TSS (mg/L)	Vazante	72	66,13	5,46	200	25,57	0,38
	Seca	71	462,71	12,74	1137,75	217,42	0,47
	Enchente	72	98,70	36,75	359,42	53,40	0,54
	Cheia	74	14,51	5,68	34,90	4,23	0,29
Clorofila (µg/L)	Vazante	71	68,78	5,61	350	63	0,91
	Seca	71	33,40	0,80	87,86	15,80	0,47
	Enchente	72	8,20	0,21	25,79	4,16	0,49
	Cheia	74	28,85	1,16	131,28	21,61	0,75
COD (ppm)	Vazante	72	8,37	4,20	31,52	4,17	0,63
	Seca	72	6,04	1,03	11,38	1,63	0,27
	Enchente	69	5,56	2,81	11,25	1,60	0,28
	Cheia	76	6,73	4,38	15,29	1,94	0,28

Fonte: Barbosa (2005).

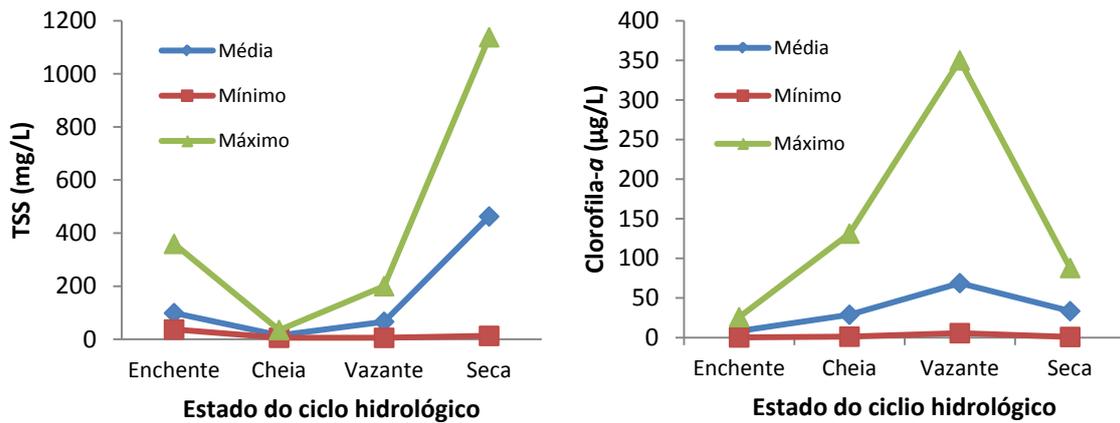


Figura 3.3 – Variação do TSS e Chl-a na Planície de Curuai para os quatro estados do ciclo hidrológico entre 2003 e 2004.  
 Fonte: Barbosa (2005).

Além da grande dimensão da área de estudo, complexidade óptica da água e influência do pulso de inundação, a cobertura de nuvens é outro fator que pode dificultar os estudos do sensoriamento remoto óptico na Amazônia. Segundo Alves et al. (2007), a região Amazônica caracteriza-se pela grande quantidade de vapor d'água na atmosfera, fortes fluxos de calor latente provenientes da superfície e elevado índice pluviométrico. Estas características favorecem a ocorrência intensa de nebulosidade na região. Alves et al. (2007) mostraram através de análise de uma série histórica entre 1983 a 1994, que entre os meses de março e abril a cobertura de nuvens foi de aproximadamente 80% (Figura 3.4). A análise foi realizada para um setor de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  (aproximadamente 280 km x 280 km) centrado em Manaus, região próxima à área de estudo do presente trabalho.

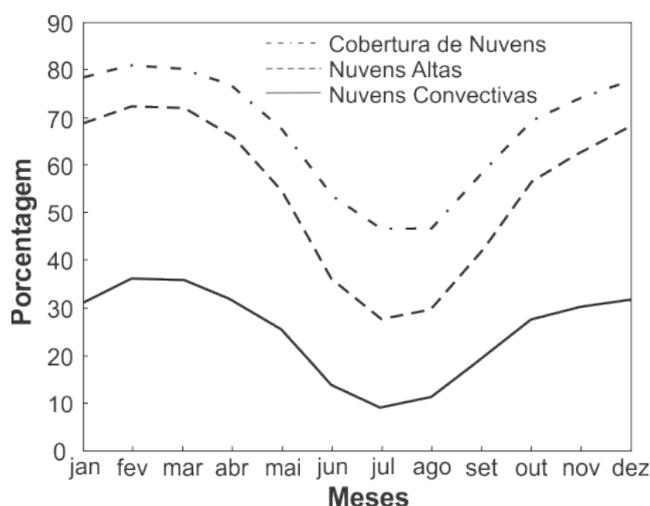


Figura 3.4 - Variação anual da cobertura de nuvens na região central da Amazônia.  
 Fonte: Adaptada de Alves et al. (2007).

### 3.2. Métodos

A execução deste trabalho foi dividida em três principais etapas: aquisição dos dados, análise da fluorescência e estimativa da concentração de clorofila por sensoriamento remoto. Na análise de fluorescência, buscou-se encontrar modelos de regressão entre a Chl-*a* e a IVF, a partir de medidas realizadas em 27 estações amostrais. O objetivo desta etapa foi encontrar uma relação consistente entre Chl-*a* e a IVF que pudesse ser utilizada para converter todos os transectos de fluorescência obtidos em campo para Chl-*a*. Na terceira etapa, os valores de Chl-*a* obtidos através da estimativa pela fluorometria foram utilizados para estimar a Chl-*a* a partir dos dados de sensoriamento remoto, e posteriormente, espacializar a Chl-*a* para os lagos da planície. O fluxograma da Figura 3.5 apresenta a sequência de etapas do trabalho.

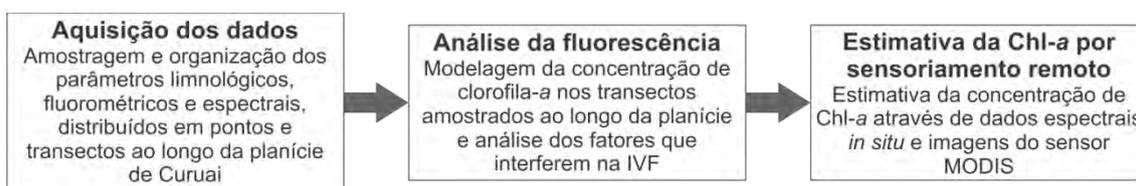


Figura 3.5 - Fluxograma geral das etapas de trabalho.

### **3.2.1. Aquisição dos dados**

A etapa de aquisição dos dados foi fundamentada na realização da campanha de campo na área de estudo, bem como na busca por imagens orbitais do sensor MODIS com baixa cobertura de nuvens.

Para que a pesquisa abrangesse um ambiente com alta complexidade óptica, a campanha de campo foi realizada no período entre 05 e 10 de abril de 2011, em pleno estado hidrológico da enchente na planície de Curuai. Este estado hidrológico implica em grandes dificuldades na estimativa da Chl-*a* na água por intermédio de métodos ópticos, devido à presença elevada concentração de partículas inorgânicas em suspensão. Durante a campanha foram coletados dados limnológicos, espectrais e fluorométricos. A estratégia de amostragem consistiu na coleta de parâmetros em 27 estações amostrais distribuídas ao longo dos diferentes lagos da planície de inundação (Figura 3.6). Esta estratégia visou selecionar pontos de coleta em regiões com massas d'água distintas e suas transições, de forma que os diferentes tipos de água fossem considerados. Ao mesmo tempo, as estações amostrais serviram de pontos para a calibração dos modelos de conversão de fluorescência em Chl-*a* dos transectos amostrados. Estes foram desenhados de forma a interligar as estações amostrais, considerando traçados espacialmente bem distribuídos ao longo das regiões percorridas.

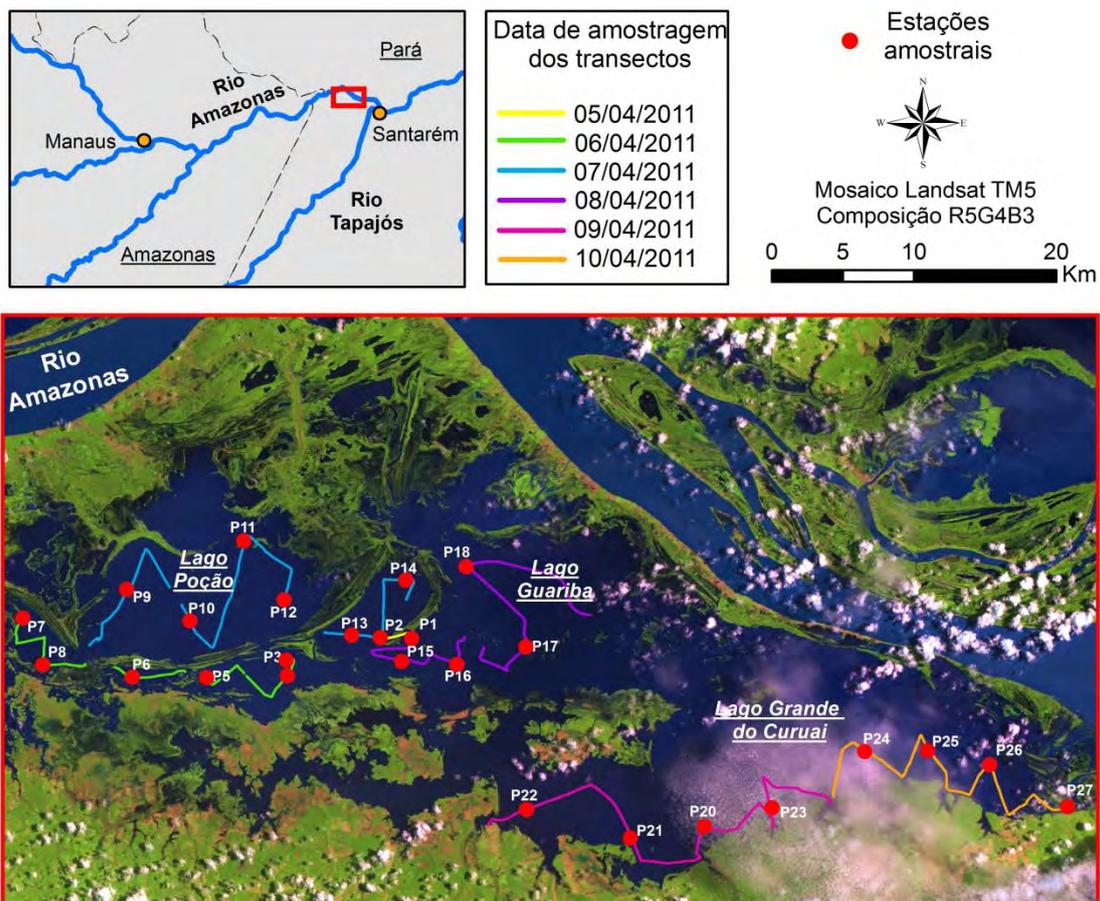


Figura 3.6 - Localização das estações amostrais (pontos em vermelho) e dos transectos de fluorescência (amarelo, verde, azul, roxo, rosa e laranja). As cores dos transectos distinguem as datas de amostragem.

Devido à dificuldade de acesso à região (necessidade de subir o rio Amazonas por 4 horas até a entrada da planície, localizada próxima ao P27), o barco utilizado era dotado de estrutura suficiente para que a equipe permanecesse embarcada durante toda a campanha. Adotando a estratégia de campo utilizada por Barbosa (2005), foi montado um mini-laboratório na embarcação, para o pré-processamento das amostras de água (filtragem, fixação e armazenagem) para que o material pudesse ser preservado até a análise em laboratório.

### 3.2.1.1. Dados limnológicos

Para cada estação amostral foram coletados os seguintes parâmetros limnológicos: temperatura, pH, turbidez, condutividade e oxigênio dissolvido, somente na camada superficial da coluna d'água, através de uma sonda multiparamétrica de qualidade da água (YSI 6600). Foi também verificada a profundidade através da utilização de uma sonda portátil (Speedtech SM5) e a transparência ao disco de Secchi. Nestes pontos foram ainda coletadas amostras de água para os procedimentos analíticos de Chl-a, TSS e COD.

As amostras de água coletadas foram então filtradas (Figura 3.7), refrigeradas e mantidas ao abrigo da luz para posterior análise laboratorial. Para as análises de Chl-a e feofitina, as amostras foram filtradas em filtros de papel Whatman GF/F e extraídas com etanol 80% quente, de acordo com a metodologia proposta por Nusch (1980). As amostras de TSS foram filtradas utilizando filtros Whatman GF/C e analisadas seguindo a metodologia de Wetzel e Likens (1991). Por fim, empregou-se o método de análise de gás por infravermelho (APHA, 1995) para a quantificação de carbono das amostras através da utilização de um Analisador de Carbono Orgânico Total (Shimadzu TOC-5000).



Figura 3.7 - Procedimentos de filtragem das amostras de água para a quantificação da Chl-a e TSS.

Cabe ressaltar ainda que não foram realizadas análises de TSS para todas as estações amostrais em função de limitações no orçamento da campanha. Para contornar este problema, foi gerado um modelo polinomial da estimativa do TSS a partir dos valores de turbidez. Barbosa (2005) utilizou este mesmo método para quantificar o TSS nas estações nas quais não foram realizadas análises laboratoriais, obtendo um único modelo para todas as estações com bom ajuste ( $R^2=0,98$ ,  $p<10^{-4}$ ).

### 3.2.1.2. Dados espectrais

Medidas espectrais realizadas em campo são importantes, pois permitem avaliar o comportamento espectral do alvo nas diferentes estações amostrais, viabilizando a avaliação e quantificação dos componentes presentes na água. Além disso, a coleta de dados espectrais através da utilização de um espectrorradiômetro elimina o efeito da atmosfera e de escala presente nas imagens orbitais (BARBOSA, 2005).

A grandeza física medida por um espectrorradiômetro é a radiância espectral, que não é adequada para a caracterização espectral de um alvo, pois está sujeita aos efeitos direcionais, ou seja, depende da configuração geométrica entre o sensor, o alvo e a fonte de energia (Sol). Um artifício matemático frequentemente utilizado para eliminar os efeitos direcionais é a conversão da radiância em fator de reflectância bidirecional:

$$FR_{\lambda} = \frac{L_{A\lambda}}{L_{R\lambda}} = \frac{\frac{E_{\lambda} \cdot \rho_{A\lambda}}{\pi}}{\frac{E_{\lambda} \cdot \rho_{R\lambda}}{\pi}} = \frac{\rho_{A\lambda}}{\rho_{R\lambda-1}} = \rho_{A\lambda}$$

onde  $L_{A\lambda}$  representa a radiância espectral do alvo e  $L_{R\lambda}$  a radiância espectral de uma superfície lambertiana (placa de referência) para um mesmo comprimento de onda e sob as mesmas condições de observação e iluminação. Já  $\rho_{A\lambda}$  e  $\rho_{R\lambda}$  representam a reflectância espectral do alvo e da placa de referência, respectivamente. O termo  $E_{\lambda}$  representa ainda, a irradiância espectral relativa à cada comprimento de onda.

A radiância espectral do alvo é obtida diretamente ao apontar o espectrorradiômetro para a superfície da água, em um ângulo de aproximadamente 40 graus em relação ao plano da superfície. A medida deve ser feita, preferencialmente, alinhado o barco na direção do Sol e realizando a coleta em um ângulo perpendicular a esta direção, evitando desta forma o efeito da reflexão especular (ZIBORDI et al., 2002). Já a radiância da superfície lambertiana foi medida através do apontamento do sensor a uma placa de referência na qual a energia incidente é refletida igualmente em todas as direções.

Neste trabalho foi utilizado um espectrorradiômetro *ASD Field Spec Hand Held* ligado a um notebook para o registro dos dados. Foi também utilizada uma placa de referência Spectralon. As coletas foram realizadas sempre entre 9:30 e 15:30 horas, para garantir ângulos de inclinação solares adequados para este tipo de procedimento. Em cada estação amostral foram realizadas 15 medidas espectrais para que posteriormente fossem eliminados os espectros não representativos e calculada a média para os restantes.

### **3.2.1.3. Dados fluorométricos**

Os dados de IVF foram obtidos com o fluorômetro Turner Designs modelo 10-AU-005-CE configurado no modo de fluxo contínuo e conectado a uma bomba autoescorvante de 12 V (Figura 3.8 (b) e (c)). Localizada na saída do equipamento, a bomba opera a uma taxa de fluxo de aproximadamente 23,8 L.min<sup>-1</sup>. O fluorômetro é equipado com um tubo fotomultiplicador (Hamamatsu R446) e opera na faixa espectral que varia entre 185 a 870 nm. Foi instalado um kit óptico (10-037R) composto por um filtro de excitação Andover 10-050R (240 a 500 nm), um filtro passa alta Andover 10-051R (>665) e uma lâmpada 10-045 (*Daylight White*). A mangueira de coleta de água foi instalada a uma profundidade fixa de 30 cm abaixo da superfície da água. Esta foi a profundidade mínima para evitar a entrada de bolhas de ar no sistema em

função da movimentação da água pelas ondas. A velocidade média da embarcação ao longo do transecto foi de  $8 \text{ km.h}^{-1}$ .

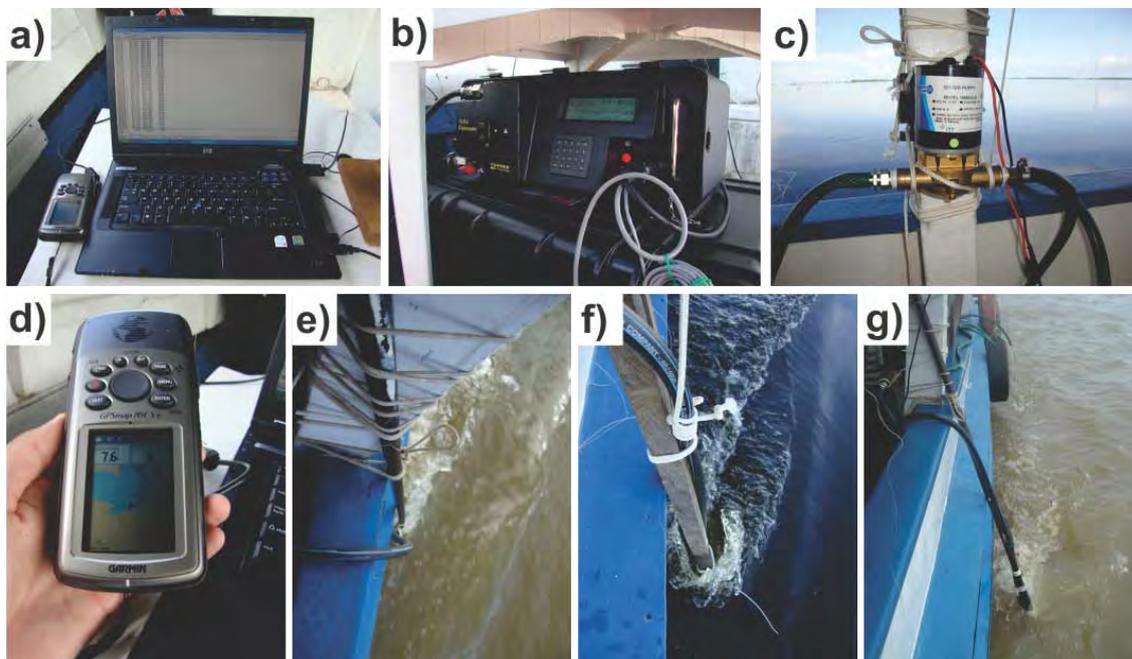


Figura 3.8 - Procedimentos de coleta e integração dos dados geográficos e de fluorescência. As fotos apresentam (a) a janela de visualização dos dados de fluorescência e coordenadas geográficas integrados; (b), (c) e (d) operação do fluorômetro, bomba autoescorvante e GPS, respectivamente; (e), (f) e (g) a instalação da haste de sustentação e mangueira de coleta de água.

A Tabela 3.2 apresenta a descrição dos transectos amostrados e as respectivas estações amostrais.

Tabela 3.2 - Desenho amostral dos transectos amostrados na planície do LGC.

<b>Data</b>	<b>Região da Planície de Curuai</b>	<b>Extensão do transecto (km)</b>	<b>Estação amostral</b>
05/04/2011	Central	3	P1 e P2
06/04/2011	Pequenos lagos no oeste	22,5	P3 ao P8
07/04/2011	Lagos centrais e Lago Poção	30	P9 ao P11
08/04/2011	Lago Guariba	35	P15 ao P18
09/04/2011 10/04/2011	Lago Grande do Curuai	100	P19 ao P27

A integração dos dados de fluorescência com as coordenadas geográficas foi realizada de maneira automática através do aplicativo Windmill 7 (Figura 3.8 (a)), que permite integrar informações coletadas por qualquer equipamento que gere dados em ASCII diretamente pelas entradas USB e Serial (RS-232) de qualquer computador. Ao final, uma tabela com todos os parâmetros para o intervalo de tempo definido pelo próprio usuário é gerada (WINDMILL SOFTWARE, 2011). Neste trabalho, adotou-se o intervalo de dez segundos para o registro dos resultados. Sendo assim, a cada dez segundos era gerada uma nova linha na tabela de resultados, contendo as coordenadas geográficas do ponto e o respectivo valor de fluorescência.

Após a coleta foi realizado o pré-processamento dos dados fluorométricos, que consiste na conversão das coordenadas para uma unidade padrão (graus decimais) bem como a filtragem. A formação ocasional de ondas na superfície da água foi um fator presente durante a realização do trabalho de campo, provocando grande movimentação na superfície da coluna d'água, bem como movimentações excessivas da embarcação por curtos períodos. Nestas situações foi observada a entrada de bolhas de ar no sistema, resultando em

valores incorretos de fluorescência. Para eliminar estes dados ruidosos, foi feita a filtragem dos transectos através de uma janela móvel de mediana de cinco pontos.

#### **3.2.1.4. Dados orbitais**

O MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um sensor multiespectral óptico instalado a bordo das plataformas Terra e Aqua, desenvolvidos e operados pela NASA. Concebido para ser um sistema de grande qualidade no estudo da superfície terrestre, oceanos e atmosfera, o MODIS possui resolução radiométrica de 12 bits e opera em 36 bandas espectrais contidas no intervalo entre 0,4 a 14,4  $\mu\text{m}$  do espectro eletromagnético (NASA, 2011). O sensor foi projetado de forma a cobrir toda a superfície da Terra a cada dois dias através de cenas com 2330 km de largura da faixa de imageamento e apresenta resolução espacial distinta de acordo com as bandas de operação. Cada plataforma cruza a linha do Equador em horários distintos, com diferença de 3 horas: 10:30 horas para a plataforma Terra (órbita descendente) e 13:30 horas para a Aqua (órbita ascendente).

Neste trabalho, foram utilizados dados do produto MYD09, que consiste na estimativa da reflectância de superfície através das bandas 1 a 7 do sensor MODIS a bordo da plataforma Aqua. Dentre as bandas disponíveis neste produto, foram utilizadas apenas as bandas 1, 3 e 4 (faixa espectral do vermelho, azul e verde, respectivamente), por cobrirem as feições espectrais diagnósticas da presença de clorofila na água. O produto MYD09 possui resolução espacial de 500 metros, sendo que a banda 1 é reamostrada de 250 para 500 metros, compatibilizando-se assim com as demais. Apesar da existência de bandas com melhor resolução espectral para a estimativa de clorofila na água (Tabela 3.3), a baixa resolução espacial prejudica sua aplicação em ambientes aquáticos continentais. Estes produtos são mais adequados para estudos oceanográficos, tendo em vista que a extensão

destes ambientes é sensivelmente maior do que as áreas de águas continentais.

Tabela 3.3 - Bandas espectrais (1 a 16) do sensor MODIS e suas principais aplicações.

<b>Banda</b>	<b>Faixa de operação (nm)</b>	<b>Resolução espacial (m)</b>	<b>Principais aplicações</b>
1	620 – 670	250	Terra / Nuvens / Aerossóis limite
2	841 – 876		
3	459 – 479	500	Terra / Nuvens / Aerossóis propriedades
4	545 – 565		
5	1230 - 1250		
6	1628 - 1652		
7	2105 - 2155		
8	405 – 420	1000	Cor do oceano / Fitoplâncton / Biogeoquímica
9	438 – 448		
10	483 – 493		
11	483 – 493		
12	546 – 556		
13	662 – 672		
14	673 – 683		
15	743 – 753		
16	862 – 877		

Fonte: NASA (2011).

Uma imagem adquirida concomitantemente à coleta *in situ* foi reprojeta de Sinusoidal (projeção padrão dos produtos MODIS) para Geográfica através do aplicativo *MODIS Conversion Toolkit*, bem como convertida para o formato *geotiff*. Em seguida, a área de interesse foi recortada e mascarada para eliminar pixels sobre terra firme. Para definir a máscara, utilizou-se uma banda do infravermelho (banda 6) na qual a resposta espectral da água é muito baixa, enquanto os alvos terrestres apresentam valores consideráveis. Este procedimento possibilita a exclusão de regiões fora do interesse de análise, por

meio de um fatiamento simples. Também foram excluídos os pixels cobertos por nuvens.

Cabe ressaltar ainda que a área de estudo estava localizada no centro da cena da imagem MODIS, próxima ao Nadir, minimizando possíveis efeitos de distorções radiométricas. Finalmente, como os produtos MODIS já vêm processados, não foi necessário realizar o georreferenciamento e a correção atmosférica da imagem.

### **3.2.2. Análise da fluorescência**

Após a realização da campanha de campo, o primeiro passo foi ajustar um modelo que relacionasse as medidas de IVF com a Chl-*a* nos pontos de coleta. Para isto, foram utilizados os valores obtidos em 27 estações amostrais. A Figura 3.9 apresenta o fluxograma das etapas desta análise.

Na construção do modelo, dois métodos foram avaliados para definir o valor de IVF a ser relacionado com a Chl-*a*: método instantâneo e da média. O primeiro consistiu na anotação do valor de fluorescência em campo, concomitantemente à coleta da amostra de água para a determinação da Chl-*a* nas estações amostrais. Já no segundo método, foi calculada a média da fluorescência para cada estação amostral, dentro de um raio de deslocamento de 500 metros (baseado na resolução espacial dos dados orbitais utilizados). Este segundo método foi avaliado, pois a embarcação não era ancorada em cada estação amostral, sofrendo breves deslocamentos durante o período de amostragem.

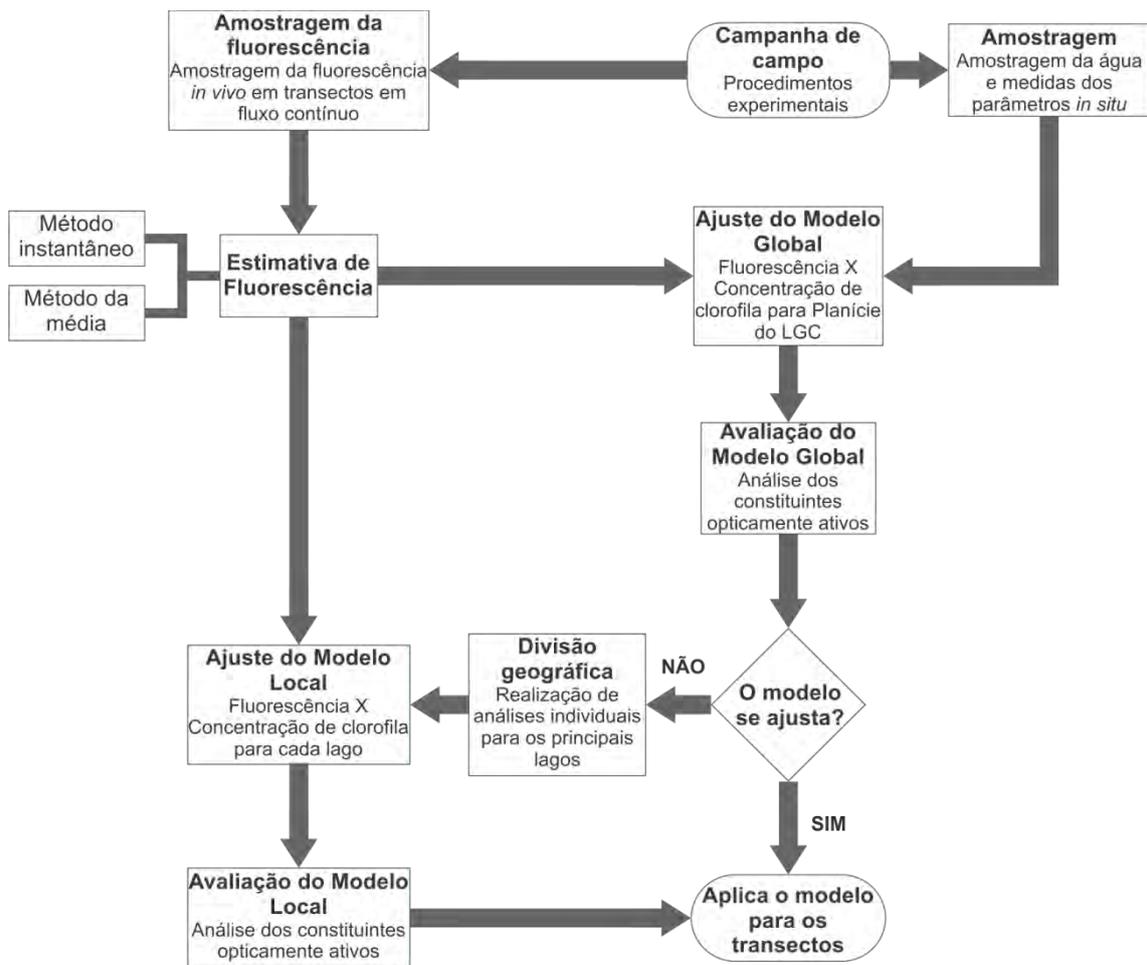


Figura 3.9 - Fluxograma com a metodologia de análise de fluorescência proposta.

Uma vez obtido os valores de fluorescência, a etapa seguinte consistiu no ajuste entre as medidas de IVF e a Chl-*a* determinada pelo método analítico. Duas abordagens foram avaliadas: i) ajuste por um modelo global, onde todas as estações amostrais foram utilizadas em um único modelo; e ii) ajustes por modelos locais onde o conjunto de estações foi separado por lagos da planície (regiões), e um modelo foi ajustado para cada lago. O objetivo destas duas abordagens de ajuste foi avaliar que tipo de modelo, global ou regional, seria adequado para o conjunto de medidas disponível.

### **3.2.3. Estimativa da concentração de clorofila por sensoriamento remoto**

O objetivo desta etapa foi investigar um modelo robusto passível de ser aplicado às imagens orbitais para espacializar as variações de clorofila na área de estudo. Para tanto, foi utilizado o conjunto de dados disponíveis (transectos de Chl-a estimados através da fluorometria, espectros *in situ*, Chl-a extraída e imagem MODIS). Foram avaliadas quatro tentativas de modelos: i) dois exploratórios, construídos a partir dos dados radiométricos de campo; e ii) dois a partir das imagens do sensor MODIS. No fluxograma (Figura 3.10), a sigla Chl-a Lab refere-se à concentração de clorofila extraída em laboratório, enquanto a sigla Chl-a IVF à estimada pela fluorescência *in vivo* nos transectos.

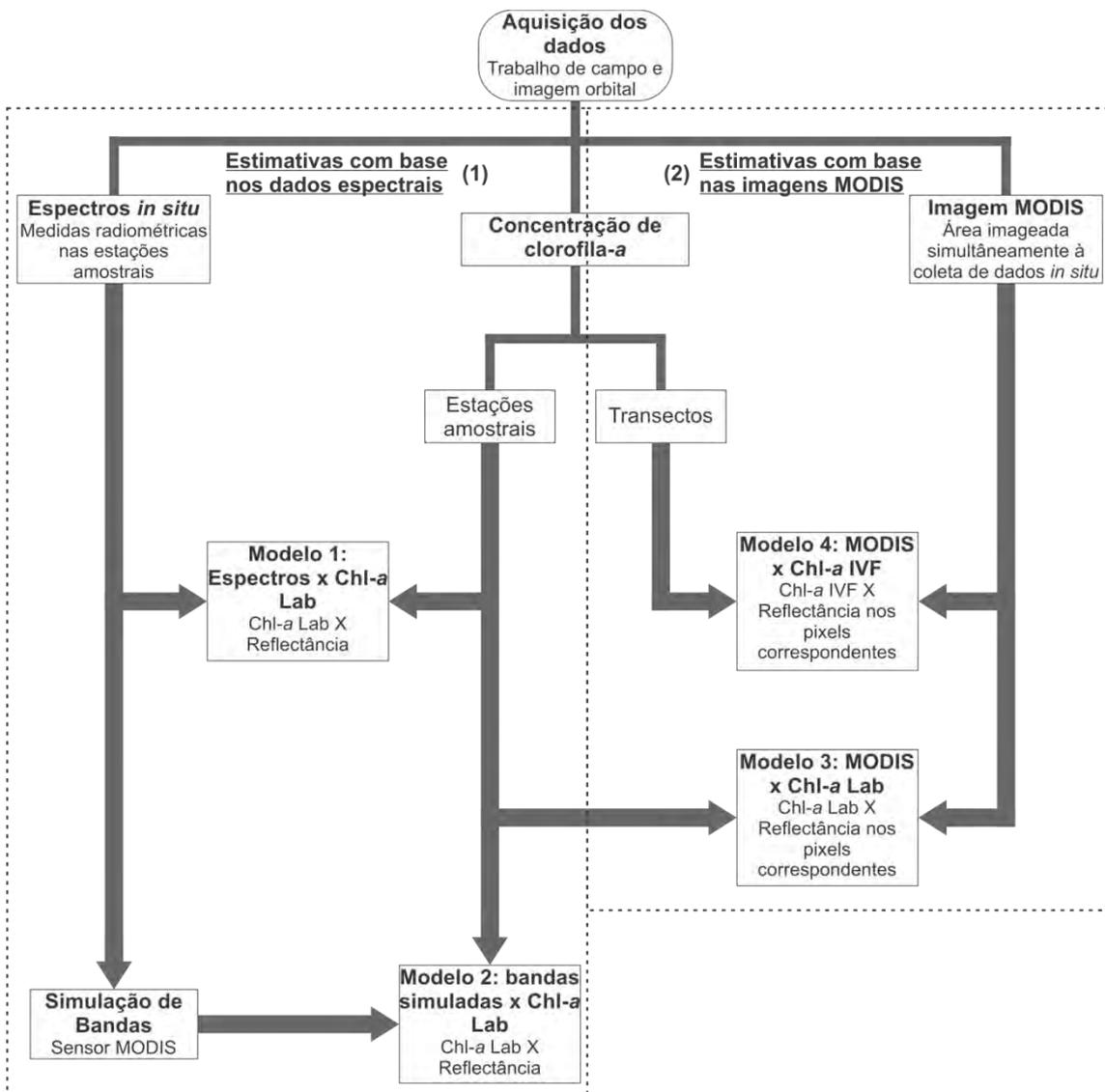


Figura 3.10 - Fluxograma das etapas de estimativa da Chl-a através do sensoriamento remoto.

### 3.2.3.1. Modelo 1: Espectros x Chl-a Lab

Como um passo inicial, antes de estimar clorofila integrando IVF e imagens, realizou-se uma análise exploratória dos dados obtidos em campo. Esta análise teve o objetivo de avaliar, para as condições ambientais de campo e sem interferência atmosférica, a qualidade dos dados radiométricos e da Chl-a Lab na obtenção de um modelo para estimar clorofila. A análise constou da tentativa de ajuste de modelos de regressão entre razão de bandas espectrais

e concentração de clorofila. A razão utilizada foi entre a reflectância máxima no infravermelho (entre 700 e 720 nm), e a reflectância mínima no vermelho (entre 670 e 690 nm), descrita na literatura como um previsor simples e rápido para avaliar a concentração de clorofila em corpos d'água a partir de dados espectrais (GITELSON et al., 2008; RUNDQUIST et al., 1996).

#### **3.2.3.2. Modelo 2: Bandas simuladas x Chl-a Lab**

A segunda análise investigou a relação entre a Chl-a Lab e razões de bandas espectrais simuladas para o sensor MODIS, a partir de espectros coletados em campo. As funções de resposta espectral das bandas do MODIS utilizadas para a simulação são apresentadas no Apêndice A. O sensor MODIS foi selecionado por ter resolução temporal compatível com a campanha de campo. Teoricamente, como as bandas simuladas não incluem a interferência atmosférica, esta seria uma forma mais eficiente de conseguir o ajuste entre os valores das bandas dos sensores e a Chl-a. O resultado desta análise indicaria a qualidade máxima que se pode conseguir para estimar a concentração de clorofila nos lagos da planície através do sensor MODIS, com base nos dados coletados.

#### **3.2.3.3. Modelo 3: MODIS x Chl-a Lab**

Após o uso de dados radiométricos de campo, que não possuem interferência atmosférica, nas duas análises anteriores, dados do sensor MODIS adquiridos concomitantemente à campanha de campo foram utilizados nesta terceira análise. Foi testada a correlação da Chl-a Lab com a razão de bandas infravermelho próximo/vermelho (banda 1/banda 4) do sensor MODIS. Esta análise teve como objetivo avaliar o uso da imagem MODIS, considerando a disponibilidade quase diária dos dados e o acesso gratuito, na estimativa da Chl-a por sensoriamento remoto. Para esta análise, a Chl-a em cada ponto foi comparada à razão espectral do pixel vizinho mais próximo ao ponto de coleta.

#### **3.2.3.4. Modelo 4: MODIS x Chl-a IVF**

Enquanto nas análises anteriores somente foram utilizados valores de clorofila das estações amostrais (Chl-a Lab), nesta última análise os valores de Chl-a IVF estimados ao longo do transecto de fluorescência foram relacionados com a razão de bandas espectrais (banda1/banda4) da imagem MODIS, adquirida concomitantemente à amostragem dos transectos. Os dados foram importados para o sistema de informações geográficas TerraView 4.2.0, no qual foi possível cruzar os dados matriciais da imagem com os vetoriais dos transectos. Dentro do ambiente do software, foi calculada a média dos valores de Chl-a correspondentes aos pixels da imagem MODIS.

A imagem MODIS foi submetida a uma classificação não supervisionada por pixel (K-média), visando agrupar massas d'água opticamente homogêneas. Uma tentativa de ajuste foi então realizada entre os valores de Chl-a IVF e os valores espectrais dos pixels correspondentes, dentro de cada massa d'água homogênea (classe).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados limnológicos amostrados em campo, os resultados das análises laboratoriais e os valores TSS estimados a partir de dados de turbidez estão apresentados no Apêndice B.

### 4.1. Análise da fluorescência

A estimativa de Chl-a a partir da IVF utilizando todo o conjunto de dados (modelo global) não apresentou um bom ajuste, independente do método de estimativa de fluorescência utilizado (Figura 4.1). Duas tendências foram observadas nos resultados: i) um conjunto de valores mais baixos de clorofila (até  $8 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) no qual há uma grande variação na fluorescência (entre 20 e 40); e ii) outro conjunto de valores no qual há uma ampla variação na concentração de clorofila ( $8$  a  $32 \mu\text{g.L}^{-1}$ ), com variações mínimas de fluorescência. Estes resultados sugerem que as amostras pertencem a ambientes não apenas opticamente complexos, mas distintos.

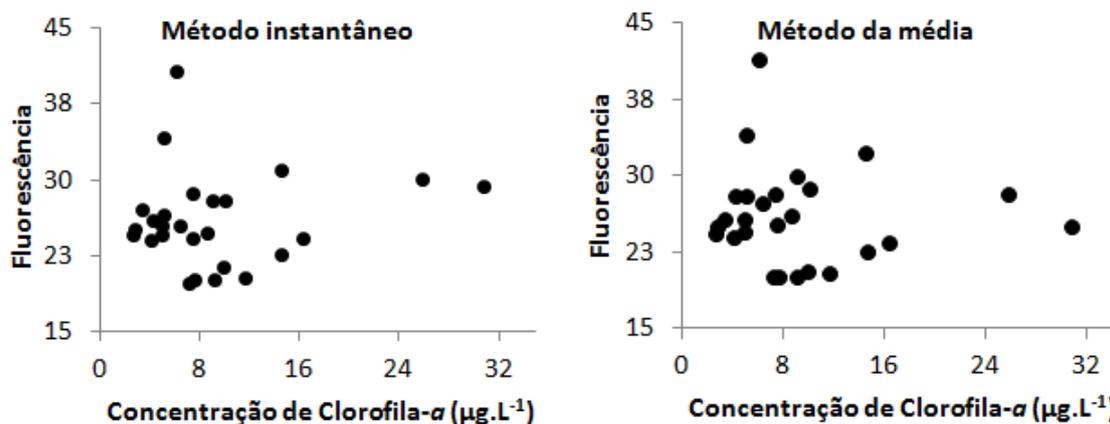


Figura 4.1 – Gráficos de dispersão entre a Chl-a e a IVF através dos métodos de estimativa instantâneo e da média na planície de Curuai.

A estatística descritiva dos parâmetros amostrados na planície de Curuai (Tabela 4.1) mostra uma grande variabilidade na concentração dos COAs na água, o que afeta diretamente o campo de luz e, conseqüentemente, as

medidas de IVF. Este é um dos fatores que pode explicar o baixo ajuste encontrado a partir de todo o conjunto de dados.

Os valores de IVF apresentaram um coeficiente de variação de 18%, enquanto a Chl-a apresentou coeficiente de variação de 72%, sugerindo que as medidas de fluorescência não conseguiram capturar toda a variabilidade da clorofila no ambiente. O TSS não apresentou valores tão altos quanto os descritos por Barbosa (2005) para o estado da enchente, porém apresentou elevado coeficiente de variação (54%). A concentração do COD apresentou valores elevados, com cerca de 26% de coeficiente de variação. Um importante aspecto a ser observado é a ampla variação na razão entre feofitina/Chl-a. Essa razão pode ser usada como um indicador do estado fisiológico do fitoplâncton, sendo que um aumento da razão indicaria a degradação do fitoplâncton, situação na qual os processos de absorção e reemissão de fótons são afetados (REYNOLDS, 2006).

Tabela 4.1 - Estatística descritiva dos parâmetros amostrados durante a campanha de campo na planície de inundação de Curuai.

<b>Variáveis</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>n</b>
Fluorescência Inst.	25,96	4,66	17,95	19,77	40,74	26
Fluorescência Média	26,13	4,80	18,37	20,08	41,40	26
Clorofila-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	9,26	6,72	72,57	2,67	30,84	26
Feofitina ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	5,63	2,56	45,47	0,91	11,87	26
Feofitina/Chl-a	0,95	0,81	85,26	0,13	3,41	26
COD ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	4,18	1,11	26,56	3,11	8,31	26
TSS ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	11,25	6,17	54,84	4,26	26,68	26
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	30,49	0,81	2,66	29,32	32,99	26

Tendo em vista o baixo ajuste do modelo global, o conjunto amostral foi dividido de acordo com a localização geográfica dos transectos dentro da

planície de inundação. Estas análises, contudo, foram restritas aos lagos que apresentaram pelo menos três amostras, de forma que fosse possível analisar a dispersão dos dados de fluorescência em função dos componentes opticamente ativos da água, pelo método dos mínimos quadrados (KUTNER et al., 2004). Apenas três lagos se enquadraram neste critério: Lago Poção, Lago Guariba e Lago Grande do Curuai.

#### 4.1.1. Lago Poção

Os gráficos de dispersão das amostras do Lago Poção (Figura 4.2) mostram que independentemente do método de estimativa da IVF, a Chl-*a* não apresenta relação com a IVF. Neste caso, considera-se que o pequeno número de amostras ( $n=4$ ) pode não ter representado a variabilidade da água existente no lago, sendo este um dos fatores que explicaria o baixo ajuste do modelo.

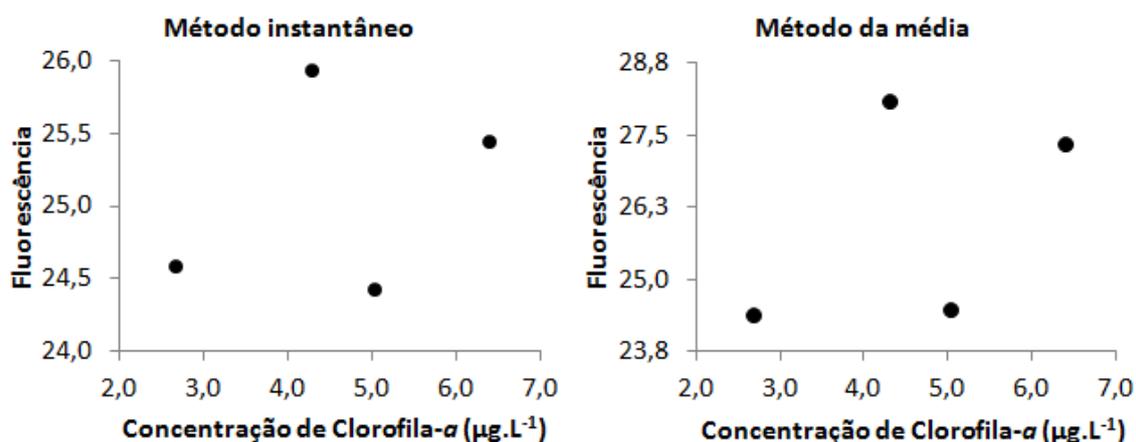


Figura 4.2 – Gráficos de dispersão entre as variáveis Chl-*a* e IVF, considerando os métodos de estimativa instantâneo e da média no Lago Poção.

Os resultados apresentados pela Tabela 4.2 mostram que o Lago Poção apresentou menor Chl-*a* média em relação à área total da planície de inundação. Esta baixa concentração pode ser uma consequência da estreita camada eufótica no lago (até 1,2 metros para 40 cm de profundidade de Secchi). O TSS apresentou elevado coeficiente de variação (49,5%), de forma similar ao comportamento observado para conjunto total das amostras na

planície. A razão feofitina/Chl-a variou em torno de 44%, sugerindo a existência de grandes variações no estado fisiológico do fitoplâncton no lago (Figura 4.3 (a)). Observa-se que existem locais onde a concentração de feofitina é duas vezes maior do que a de clorofila, indicando que a fase de degradação de fitoplâncton é muito avançada. Existem também situações nas quais a atividade fotossintética está muito ativa, fato sugerido pela razão mínima de 0,69. Deve-se destacar, entretanto, que o baixo número de amostras e a grande variação dos parâmetros neste lago não permitiram a realização de análises com significância estatística.

Tabela 4.2 - Estatística descritiva dos parâmetros amostrados durante a campanha de campo no Lago Poção.

<b>Variáveis</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>N</b>
Fluorescência	25,10	0,72	2,87	24,42	25,93	4
Clorofila-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	4,60	1,55	33,70	2,67	6,40	4
Feofitina ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	5,24	0,75	14,31	4,44	6,22	4
Feofitina/Chl-a	1,28	0,57	44,53	0,69	2,00	4
COD ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	4,17	0,76	12,23	3,38	5,10	4
TSS ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	12,00	5,94	49,50	6,77	20,31	4
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	30,43	0,48	1,58	29,80	30,98	4
Secchi (cm)	41,25	8,54	20,70	30,00	50,00	4
Profundidade (m)	5,30	0,18	3,40	5,10	5,50	4

Na tentativa de explorar as causas da ausência de uma relação entre Chl-a e a IVF no Lago Poção, uma série de razões entre Chl-a e os demais componentes opticamente ativos foram examinadas (Figura 4.3). Apesar da concentração de COD no lago ser constante, o valor médio de  $4,17 \text{ mg.L}^{-1}$  pode afetar sensivelmente a disponibilidade de energia a ser absorvida pela clorofila na região espectral do azul. Consequentemente, menor quantidade de fótons estaria disponível para o processo de fotossíntese. O gráfico de dispersão entre a IVF e a razão Chl-a/COD indica que a fluorescência aumenta à medida

que esta proporção também aumenta (Figura 4.3 (b)). Em outras palavras, quanto menor a quantidade de COD em relação à clorofila, menor será o seu efeito de mascaramento da fluorescência.

Com relação à interação entre clorofila e o TSS (Figura 4.3 (c)), os valores de fluorescência apresentaram tendência de queda com o aumento a relação Chl-*a*/TSS. Este resultado indica que quando o TSS é o componente dominante, grande parte da REM registrada pelo fluorômetro corresponde ao espalhamento pelos materiais em suspensão, afetando assim a relação clorofila/fluorescência. A relação entre a IVF e a razão COD/TSS (Figura 4.3 (d)) apresentou relação inversa entre os parâmetros, sugerindo que o TSS se possa se relacionar linearmente com o COD. O número limitado de observações, entretanto, não permitiu determinar a significância estatística dessa relação.

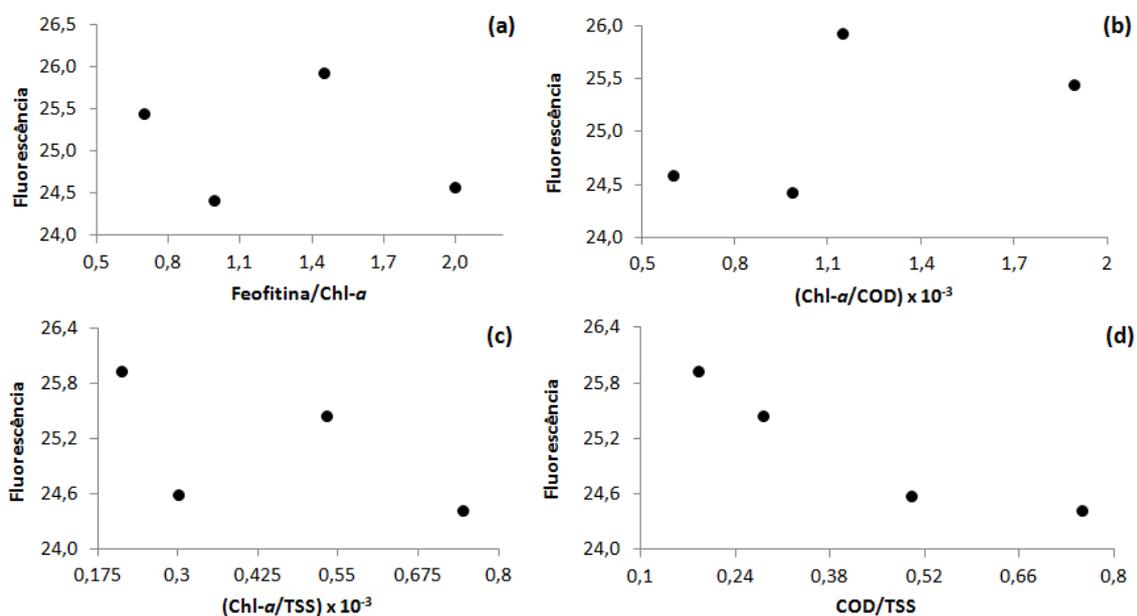


Figura 4.3 – Gráficos de dispersão entre a IVF e a razão de componentes da água no lago Poção: (a) Feofitina/Chl-*a*; (b) Chl-*a*/COD; (c) Chl-*a*/TSS; (d) COD/TSS.

#### 4.1.2. Lago Guariba

Os gráficos de dispersão da Figura 4.4 indicam que existe uma relação crescente entre Chl-*a* e a IVF, embora não seja possível estabelecer relações estatísticas significativas. Assim como no lago Poção o baixo número de amostras (n=4) pode não ser representativo da variabilidade do sistema. Ainda assim, foi realizada uma análise descritiva na tentativa de compreender a influência dos constituintes da água na IVF.

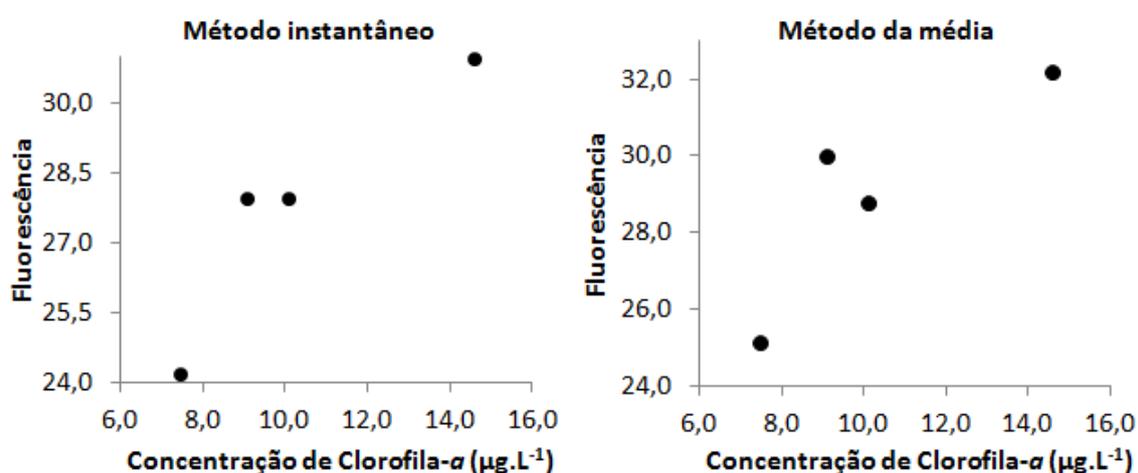


Figura 4.4 - Gráficos de dispersão entre as variáveis Chl-*a* e IVF, considerando os métodos de estimativa instantâneo e da média no Lago Guariba.

A estatística descritiva dos parâmetros amostrados no lago Guariba está apresentada na Tabela 4.3. O lago Guariba apresentou média de Chl-*a* muito superior quando comparado ao lago Poção, podendo ser este um fator favorável à existência de uma relação entre a Chl-*a* e a IVF nesta região. O lago Guariba também apresentou a menor taxa de degradação média de clorofila de toda a planície (feofitina/Chl-*a* = 0,5), fato que indicaria que as amostras estariam fotossinteticamente mais ativas (REYNOLDS, 2006). O COD mostrou-se constante nas quatro estações amostradas, sugerindo que sua influência na IVF foi constante, e que todas as amostras pertenciam a um ambiente opticamente homogêneo, com relação a este COA.

Tabela 4.3 - Estatística descritiva dos parâmetros amostrados durante a campanha de campo no Lago Guariba.

<b>Variáveis</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>n</b>
Fluorescência	27,75	2,76	9,95	24,19	30,93	4
Clorofila-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	10,31	3,05	29,58	7,48	14,59	4
Feofitina ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )	5,24	0,46	8,78	4,78	5,85	4
Feofitina/Chl-a	0,53	0,12	22,64	0,40	0,67	4
COD ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	3,67	0,38	10,35	3,11	3,96	4
TSS ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	19,83	9,16	46,19	6,52	26,68	4
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	29,80	0,53	1,78	29,32	30,29	4
Secchi (cm)	32,50	5,00	15,38	30,00	40,00	4
Profundidade (m)	5,30	0,36	6,79	4,80	5,60	4

A Figura 4.5 apresenta os gráficos de dispersão entre a IVF e os componentes da água no lago Guariba. Nota-se que a concentração média de COD é semelhante à observada no lago Poção. Como o lago Guariba apresentou maiores valores de Chl-a, nota-se uma relação direta entre a razão entre Chl-a/COD com a IVF. Este fato indica que a Chl-a foi o elemento dominante em relação ao COD neste lago. Com relação à influência do TSS, é possível observar que a IVF diminuiu conforme a razão Chl-a/TSS aumentou, comportamento semelhante ao ocorrido no lago Poção. Por fim, destaca-se ainda a relação entre a IVF e a razão COD/TSS, indicando que neste ambiente a interferência do TSS na IVF foi maior do que a do COD.

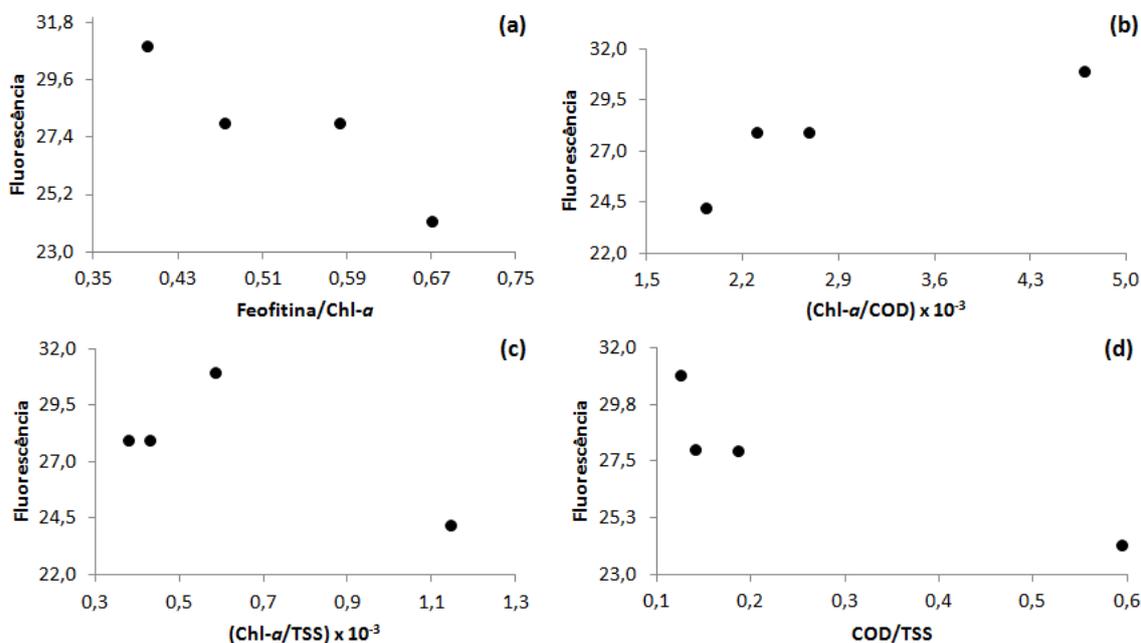


Figura 4.5 – Gráficos de dispersão entre a IVF e a razão de componentes da água no lago Guariba: (a) Feofitina/Chl-a; (b) Chl-a/COD; (c) Chl-a/TSS; (d) COD/TSS.

#### 4.1.3. Lago Grande do Curuai

A única relação entre a IVF e a Chl-a em toda a planície de Curuai, que se mostrou passível de ajuste estatisticamente significativo, foi obtida na região do LGC ( $R^2=0,94$ ,  $p<10^{-5}$ ). Para atingi-lo foi empregado o método instantâneo de estimativa de clorofila (Figura 4.6). Este também é o lago que possui um maior número de amostras ( $n=9$ ).

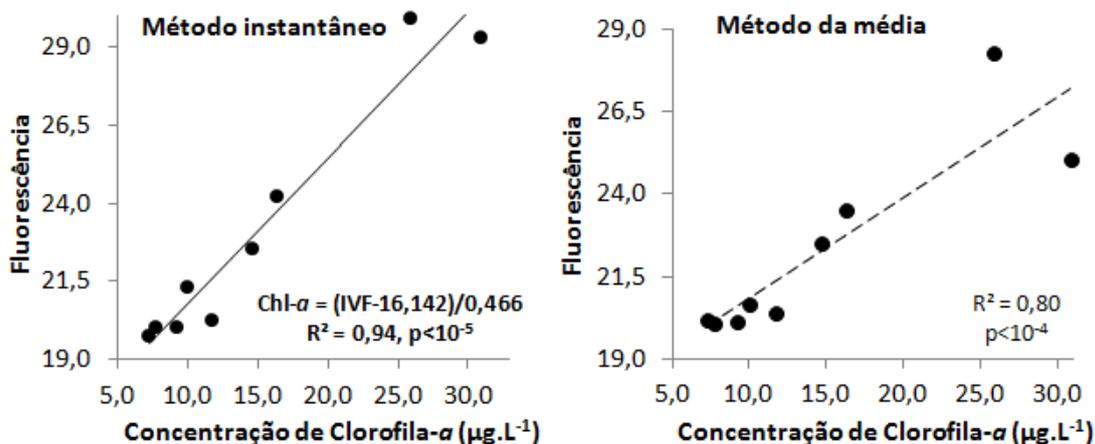


Figura 4.6 - Ajuste do modelo entre a Chl-a e a IVF através dos métodos de estimativa instantâneo e da média no Lago Grande do Curuai.

A estatística descritiva apresentada na Tabela 4.4 mostra que as maiores variações nas concentrações de Chl-*a* na planície de Curuai foram encontradas no LGC, variando de 7,22 a 30,84 µg.L<sup>-1</sup>. Além disso, este lago apresentou as menores concentrações de TSS, bem como maiores valores de transparência ao disco de Secchi. A relação feofitina/Chl-*a* caracterizou-se por valores médios menores em relação às demais estações amostrais de toda a planície, indicando que neste lago o fitoplâncton estava fotossinteticamente ativo.

Tabela 4.4 - Estatísticas descritivas dos parâmetros amostrados durante a campanha de campo no Lago Grande do Curuai.

<b>Variáveis</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>n</b>
Fluorescência	23,05	4,00	17,35	19,77	29,49	9
Clorofila- <i>a</i> (µg.L <sup>-1</sup> )	14,82	8,33	56,21	7,22	30,84	9
Feofitina (µg.L <sup>-1</sup> )	3,94	2,10	53,30	0,91	8,06	9
Feofitina/Chl- <i>a</i>	0,29	0,15	51,72	0,13	0,55	9
COD (mg.L <sup>-1</sup> )	3,65	0,30	8,22	3,27	4,03	9
TSS (mg.L <sup>-1</sup> )	7,99	1,33	16,65	6,98	11,31	9
Temperatura (°C)	30,27	0,52	1,72	29,68	31,19	9
Secchi (cm)	51,67	4,33	8,38	45,00	60,00	9
Profundidade (m)	5,98	0,84	14,05	5,10	8,00	9

Assim como nos lagos anteriores, o COD apresentou comportamento semelhante à média para toda a planície de inundação. A Chl-*a*, entretanto, mostrou média significativamente maior em relação aos demais lagos. Estas características conferem ao LGC condições ópticas favoráveis ao ajuste de modelos entre a IVF e a Chl-*a*. A razão Chl-*a*/COD (Figura 4.7 (b)) apresentou bom ajuste com a IVF ( $R^2 = 0,96$ ), resultado que converge com os obtidos para os lagos Poção e Guariba, nos quais houve um aumento na fluorescência quando a razão Chl-*a* também aumentou. No entanto, foi observada uma inversão na regressão entre a IVF e a razão Chl-*a*/TSS (Figura 4.7 (c)), comportamento divergente do relatado para os lagos anteriores. No caso do

LGC, a Chl-a foi pelo menos mil vezes maior do que o TSS, indicando que a Chl-a era o elemento óptico dominante. Finalmente, a relação COD/TSS (Figura 4.7 (d)) apresentou baixo ajuste no LGC. Este resultado pode ser atribuído à dominância do sinal espectral da fluorescência da clorofila em relação aos demais constituintes neste lago.

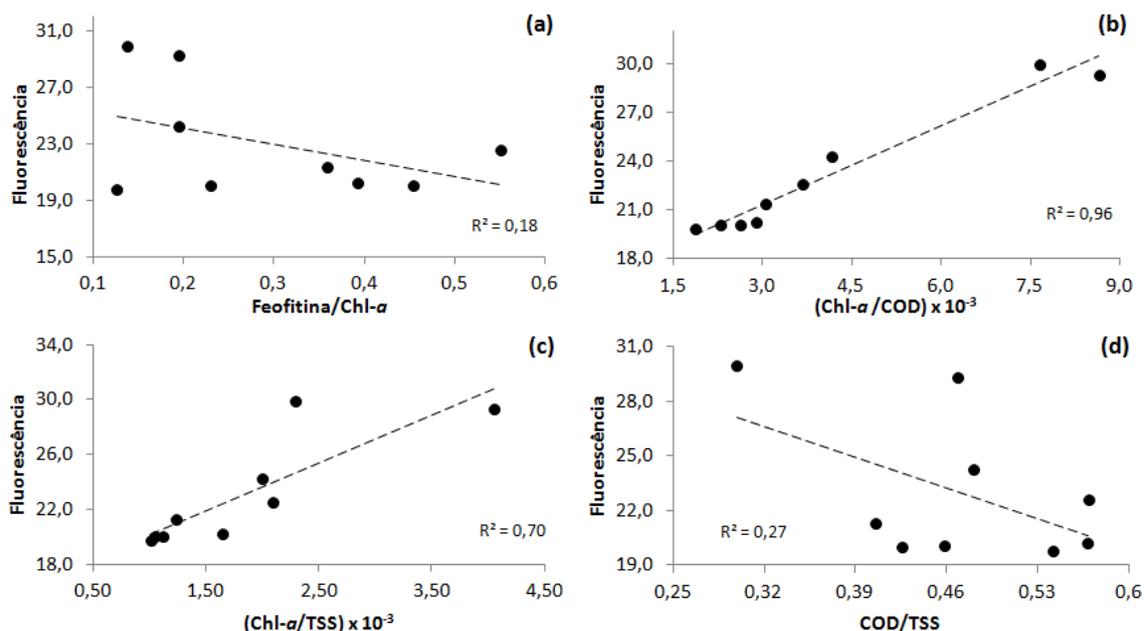


Figura 4.7 - Análise de regressão entre a IVF e a razão de componentes da água no lago Grande do Curuai: (a) Feofitina/Chl-a; (b) Chl-a/COD; (c) Chl-a/TSS; (d) COD/TSS.

#### 4.2. Estimativa da concentração de clorofila por sensoriamento remoto

Tendo em vista os resultados das análises do comportamento da IVF com relação à Chl-a, discutidos na seção anterior, e que o modelo para o LGC foi o único a apresentar significância estatística, optou-se por utilizá-lo e restringir as estimativas de Chl-a por sensoriamento remoto apenas ao LGC. As estações amostrais do LGC utilizadas nesta etapa são apresentadas na Figura 4.8, sobrepostas a uma composição colorida (R1G4B3) da imagem MODIS. Com exceção do P21int, no qual não houve coleta de amostra de água para análise laboratorial, os pontos destacados referem-se às estações amostrais nas quais havia dados de Chl-a extraída e cobertura pela imagem do sensor MODIS.

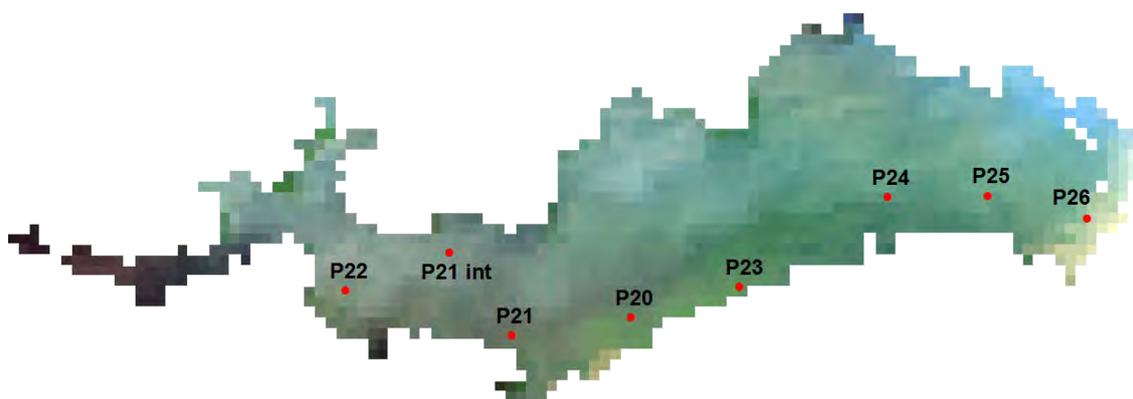


Figura 4.8 - Estações amostrais utilizadas sobrepostas a uma composição colorida (R1G4B3) da imagem MODIS adquirida no dia 10/04/2011, no LGC.

#### 4.2.1. Modelo 1: Espectros x Chl-a Lab

Não foi possível coletar espectros *in situ* em todas as estações amostrais da região, uma vez que esta medida depende de condições adequadas de iluminação e sofre grande influência da presença de nuvens. Os espectros selecionados estão apresentados na Figura 4.9. Notam-se diferenças de intensidade existentes entre as curvas espectrais, sendo associadas às variações nas condições de iluminação, e principalmente, pelas variações no TSS (Apêndice B). Entretanto, é possível observar que as feições espectrais diagnósticas da presença de clorofila na água são presentes nestas curvas.

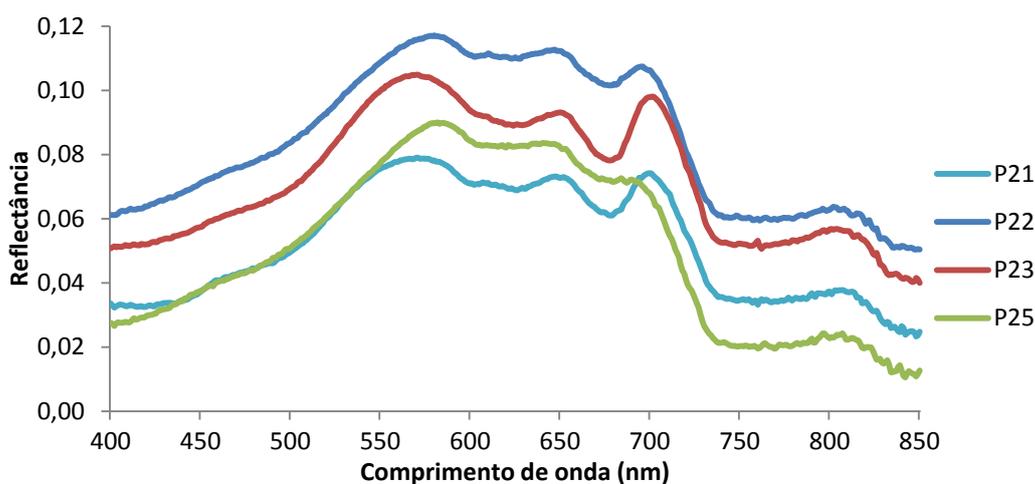


Figura 4.9 - Espectro de reflectância *in situ* dos cinco pontos amostrados no LGC.

A Tabela 4.5 apresenta os comprimentos de onda, as refletâncias mínimas e máximas na região entre o vermelho e infravermelho, as respectivas razões e as concentrações de clorofila nas estações amostrais. A tentativa de ajuste linear para estimativa de clorofila construído a partir destes dados é apresentado na Figura 4.10. O resultado mostra uma relação consistente entre a razão espectral Máx/Mín e a Chl-a, conforme o descrito na literatura. Entretanto, não foi possível gerar um modelo com significância estatística, tendo em vista o baixo número de pontos disponíveis.

Tabela 4.5 - Localização e intensidade das feições espectrais de absorção e espalhamento da clorofila na água e as respectivas Chl-a.

Ponto	$\lambda$ (nm)	Reflectância máxima	$\lambda$ (nm)	Reflectância mínima	Razão Máx/Mín	Chl-a ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )
P21	700	0,074	678	0,061	1,21	16,31
P22	695	0,107	678	0,102	1,04	14,63
P23	701	0,098	678	0,078	1,25	25,87
P25	690	0,072	680	0,071	1,01	7,68

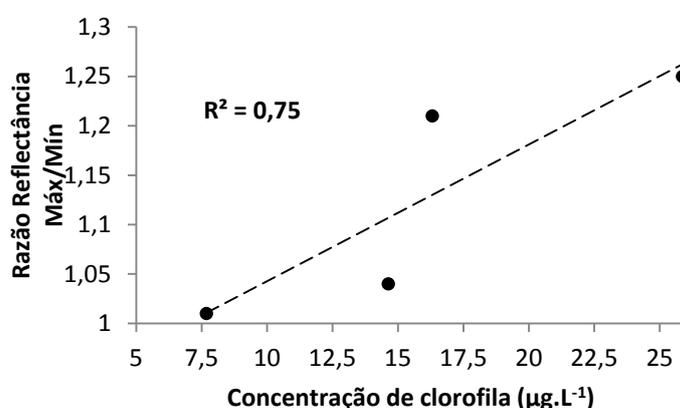


Figura 4.10 - Espectro de reflectância *in situ* dos quatro pontos amostrados no LGC.

#### 4.2.2. Modelo 2: Bandas simuladas x Chl-a Lab

As bandas do sensor MODIS foram simuladas, permitindo assim, sua comparação com os valores espectrais registrados pela imagem. A Figura 4.11 apresenta os espectros simulados e os extraídos da imagem MODIS. Os

resultados mostram que apesar da diferença de intensidade entre as curvas, as feições espectrais da clorofila na água não são destacadas por nenhum dos métodos. Ainda assim, os espectros simulados e da imagem apresentam forma bastante semelhante. Apesar de ser um sensor com boa resolução radiométrica (12 bits), o MODIS não possui bandas adequadas para a quantificação da clorofila na água, em seus produtos com 500 metros de resolução espacial. A diferença de intensidade observada entre os espectros reais e os simulados é consequência de três principais fatores: i) integração do sinal do pixel dentro de uma área de 500x500 metros; ii) influência da atmosfera, ainda que o produto MYD09 seja disponibilizado com correção atmosférica; e iii) geometria de aquisição dos dados, tendo em vista que o sensor orbital pode captar a energia em um ângulo de observação diferente.

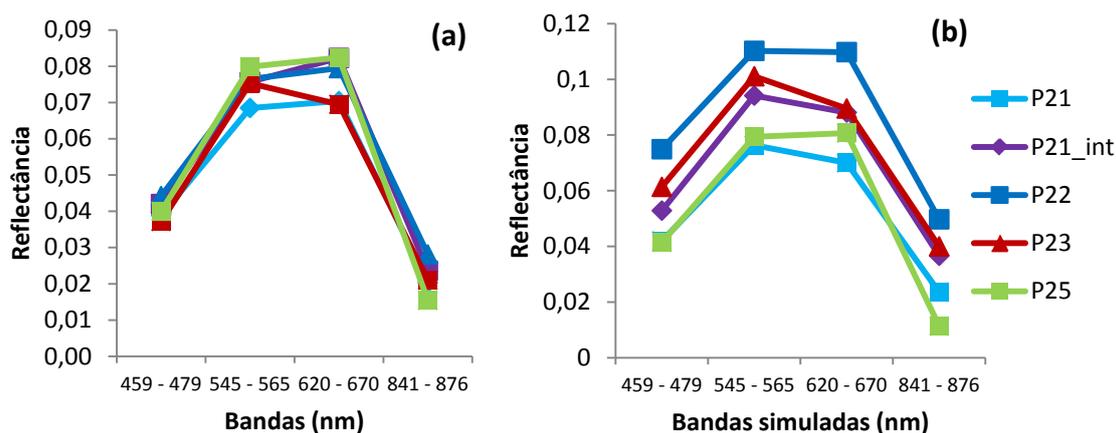


Figura 4.11 - Comparação entre os espectros de reflectância das bandas de 1 a 4 reais (a) e simuladas (b) do sensor MODIS para os mesmos pontos.

A tentativa de ajuste entre a razão banda 1/banda 4 real e simuladas do sensor MODIS com a Chl-a extraída nas estações amostrais correspondentes são apresentadas na Figura 4.12. Apesar de não ser possível obter um resultado estatisticamente significativo, nota-se que o comportamento dos resultados é semelhante. Este resultado indica a possibilidade de uso das imagens MODIS para estimar a Chl-a em águas interiores.

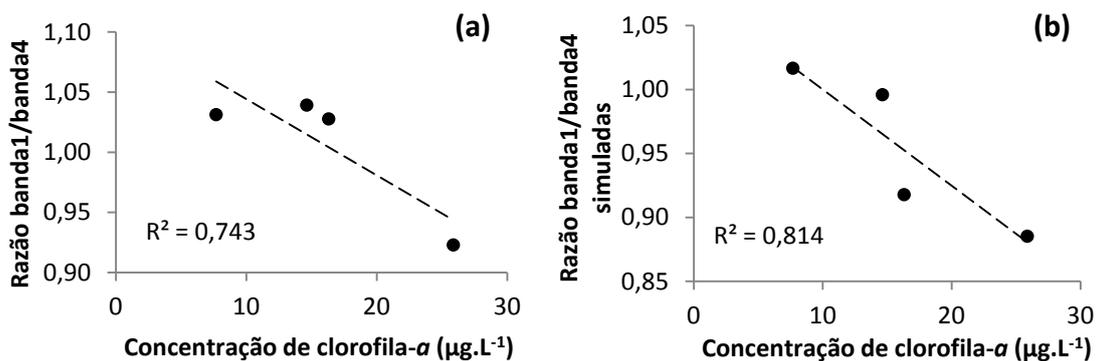


Figura 4.12 - Relação entre a concentração de clorofila extraída em laboratório e a razão banda 1/banda4 simuladas (a) e real (b) das imagens MODIS.

#### 4.2.3. Modelo 3: MODIS x Chl-a Lab

Um modelo de regressão linear simples foi ajustado entre os valores espectrais da imagem MODIS e a Chl-a. A Figura 4.13 apresenta as curvas espectrais extraídas da imagem MODIS para as bandas do visível e infravermelho próximo (1 a 4), nas estações amostrais utilizadas, através da coleta de valores do vizinho mais próximo.

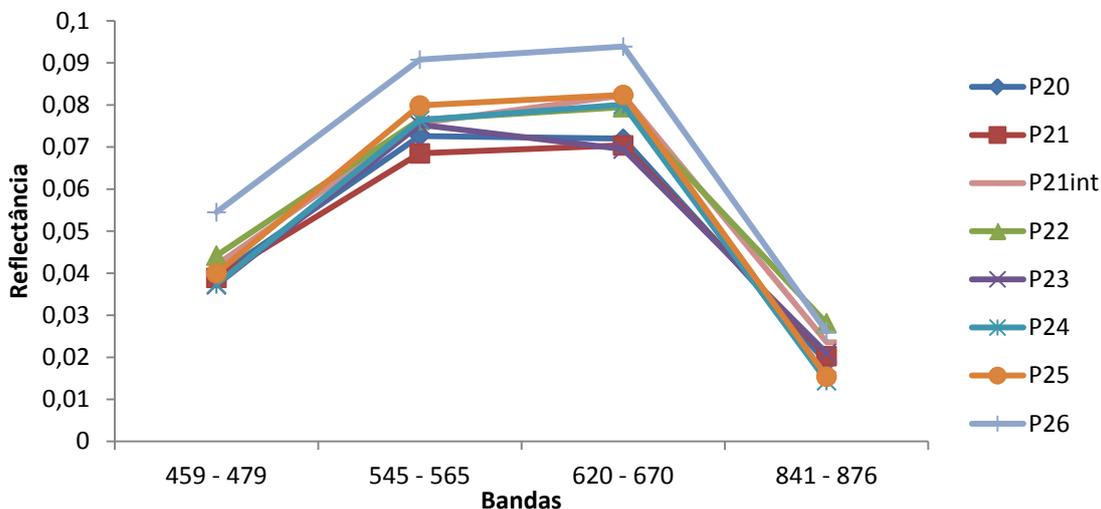


Figura 4.13 - Resposta espectral das bandas (1 a 4) coletadas a partir da imagem do sensor MODIS, nos pontos distribuídos ao longo do LGC.

Como mencionado anteriormente, a variação na intensidade das curvas espectrais está relacionada às mudanças na concentração das partículas em

suspensão na água. As diferenças espectrais entre as bandas 1 e 4, que indicaria variações na concentração de clorofila no ambiente são pouco perceptíveis através do gráfico (Figura 4.13). Apesar disso, a boa resolução radiométrica do MODIS lhe confere grande sensibilidade na detecção de variações radiométricas dos alvos, permitindo com que fosse gerado um modelo de estimativa de clorofila entre a razão banda1/banda4 para o LGC. A Figura 4.14 apresenta o resultado do modelo entre razão de bandas MODIS e Chl-a, utilizando os sete pontos referentes às estações amostrais do LGC e os pixels correspondentes na imagem.

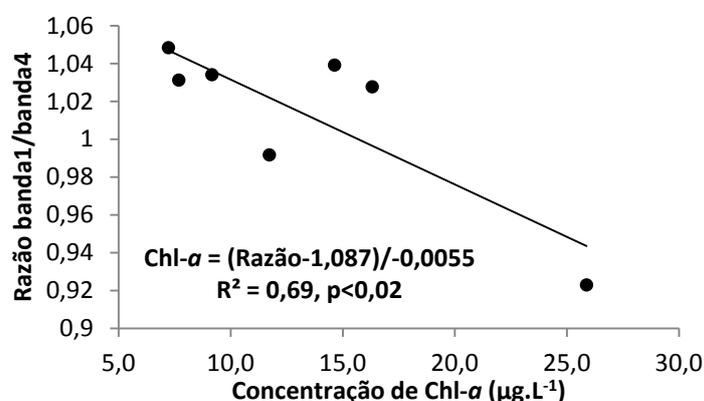


Figura 4.14 - Modelo de regressão entre a razão banda1/banda4 da imagem MODIS e a Chl-a dos pixels correspondentes.

O resultado obtido neste modelo ( $R^2=0,69$ ,  $p<0,02$ ) mostra a capacidade do sensor MODIS para estimar a Chl-a no LGC. Tendo em vista as características do produto MODIS utilizado nesta análise, seria pouco provável a obtenção de ajustes substancialmente melhores. Como explicado anteriormente, três fatores possuem consideráveis interferência nesta análise: i) influência da atmosfera nos valores espectrais adquiridos via imagem de satélite, ainda que os produtos passem por um processo de correção atmosférica; ii) efeito da integração da energia refletida pelos alvos que compõem os 500 x 500 metros amostrados pelo pixel da imagem frente à área da coleta in situ; e iii) diferença na geometria de aquisição dos dados, tendo em vista que o sensor orbital pode captar a energia em um ângulo de observação diferente em relação ao

espectro in situ. Além disso, destaca-se a baixa resolução espectral das bandas, que não possuem sensibilidade o suficiente para distinguir variações relativamente baixas de clorofila, conforme caracteriza-se o LGC (7 a 30  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ).

#### 4.2.4. Modelo 4: MODIS x Chl-a IVF

A última etapa do trabalho consistiu na tentativa de identificar uma correlação significativa entre bandas da imagem MODIS e a Chl-a IVF que permitisse o ajuste de um modelo de regressão para mapear a clorofila no LGC. A Figura 4.15 apresenta o gráfico de dispersão entre razão de bandas (banda 1/banda 4) e a Chl-a IVF. Foi utilizado o valor médio de Chl-a IVF dentro de cada pixel de 500 x 500 metros do MODIS, dado que as medidas foram realizadas de forma contínua.

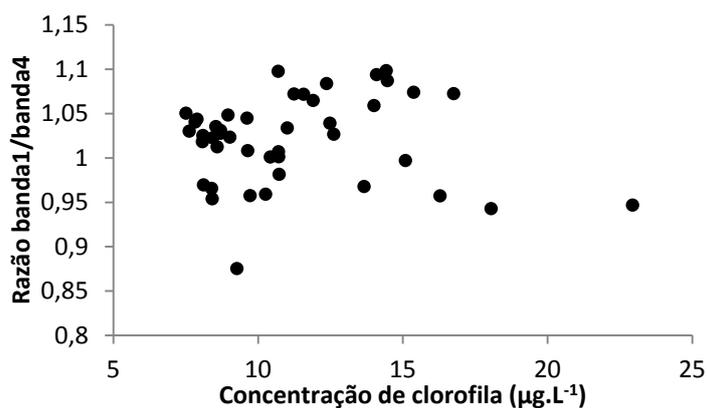


Figura 4.15 - Ajuste ente a Chl-a IVF e a razão de bandas banda1/banda4 dos pixels analisados.

A ausência de uma tendência significativa no ajuste indicou a possibilidade de existência de massas d'água com características ópticas distintas dentro do próprio LGC. Em função deste resultado, submeteu-se a imagem razão de bandas a uma classificação não supervisionada, no intuito de agrupar massas d'água espectralmente semelhantes e então realizar uma nova tentativa de ajuste.

Após uma análise exploratória, chegou-se a um resultado de classificação com cinco classes, utilizando um limiar de aceitação de 15% e 10 iterações no processamento. Os resultados da classificação, bem como a porcentagem de cada classe estão apresentados na Figura 4.16.

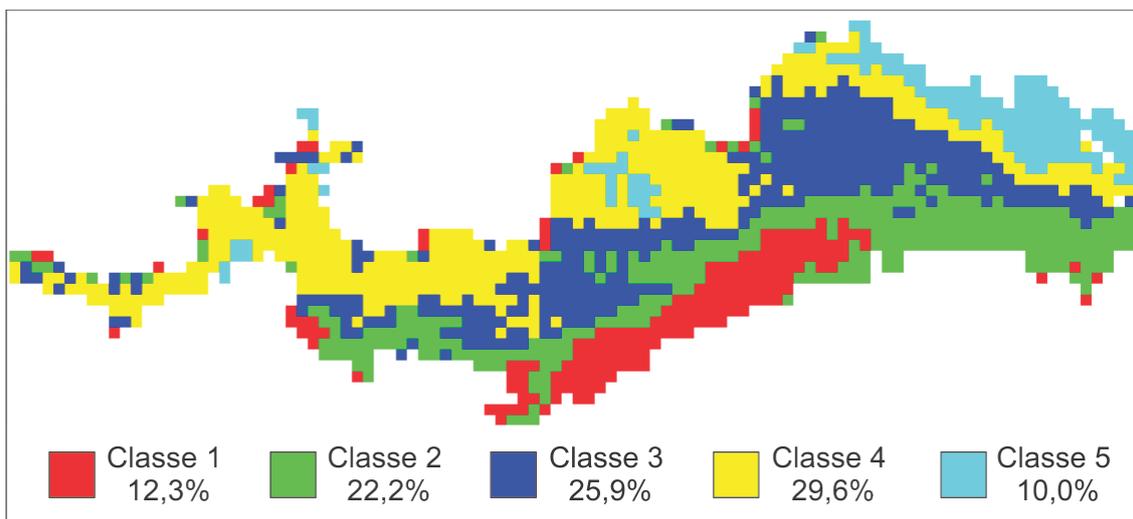


Figura 4.16 – Classificação pixel a pixel da imagem MODIS no LGC e distribuição das classes.

Após a comparação entre o resultado da classificação e os dados coletados *in situ*, foram identificadas duas classes de massas d'água homogêneas (Figura 4.17). A classe 1 (vermelho) compreende a região de maior concentração (entre 6 e 30  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ) de clorofila no LGC, com a presença de florações de algas em superfície. Já a classe 2 (verde) representa as áreas de transição, mas ainda com considerável concentração de clorofila (até 16  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ).

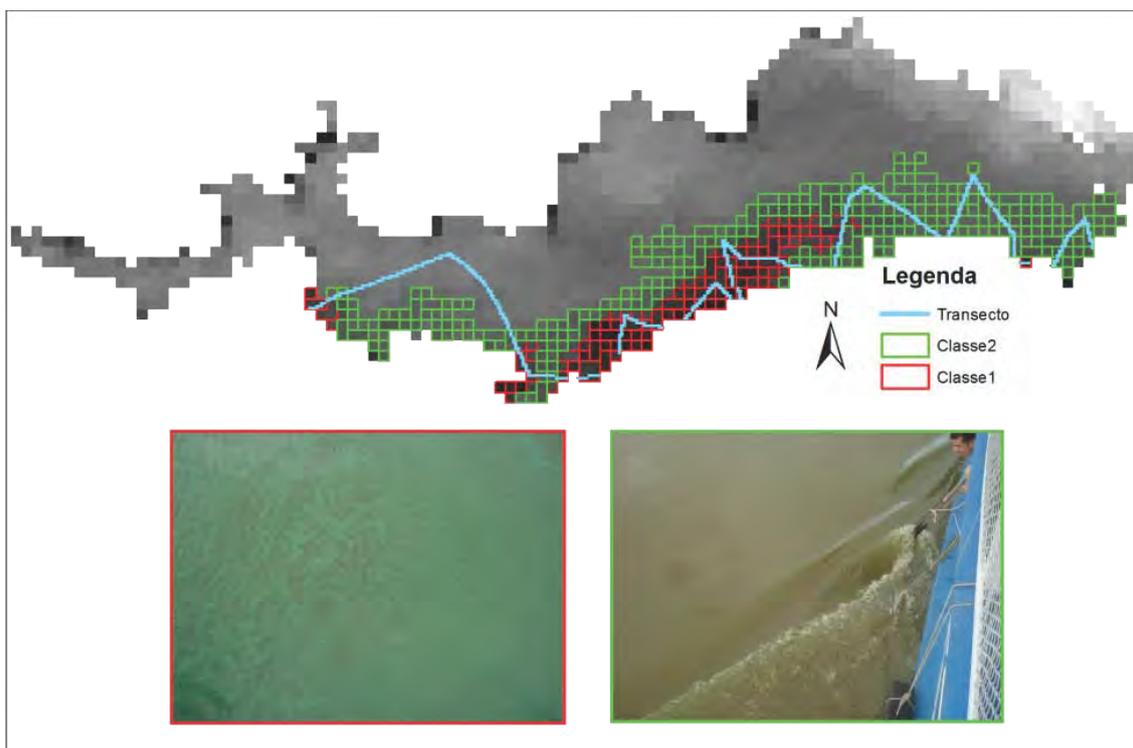


Figura 4.17 - Classes de massas d'água opticamente homogêneas na região de maior concentração de clorofila no LGC. A classe 1 (vermelha) corresponde aos locais com grande presença de florações de alga na camada mais superficial da coluna d'água, representadas pelas fotos em destaque. A classe 2 (Verde) refere-se à áreas de transição.

Os resultados das novas tentativas de ajuste entre a Chl-a IVF e a razão de bandas espectrais do MODIS para a classe 1 são apresentados pela Figura 4.18. Observa-se no gráfico de dispersão a existência de sequências de diferentes valores de Chl-a IVF para mesmos valores de razão de bandas (Figura 4.18a). Este comportamento torna claro que a baixa resolução espacial das imagens MODIS não permite detectar as variações de clorofila dentro de um pixel. Para tanto, foi calculada a média dos valores de Chl-a IVF dentro de cada pixel. Ainda assim, o modelo aplicado à classe 1 não indica haver uma tendência geral entre as amostras (Figura 4.18b). Estes resultados indicam a dificuldade de compatibilização entre os dados espectrais obtidos pelo sensor MODIS com a Chl-a IVF, ainda que dentro de um ambiente eutrófico, devido às restrições técnicas do sensor orbital para esta aplicação.

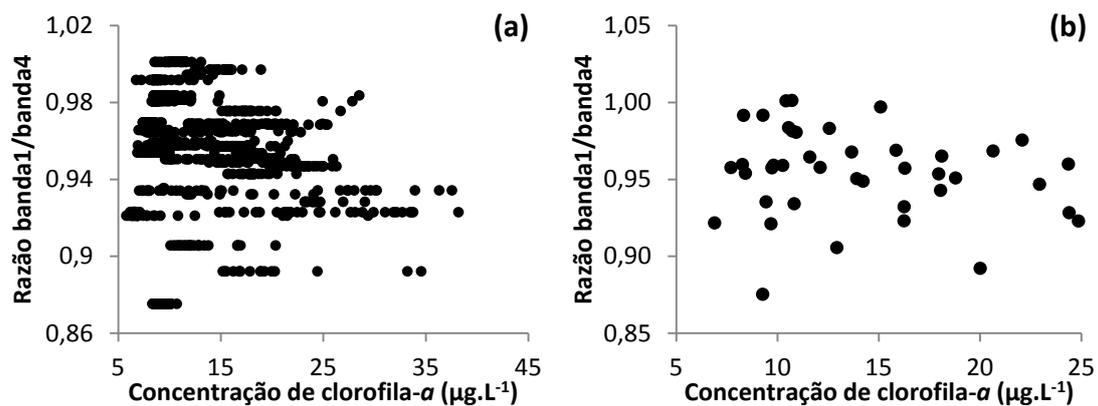


Figura 4.18 - Ajuste entre a razão banda1/banda4 e os valores brutos de Chl-a IVF (a) e médios (b) para os pixels da classe 1.

A Figura 4.19 apresenta o resultado da tentativa de ajuste entre a Chl-a IVF e a razão de bandas espectrais do MODIS para a classe 2. Assim como para a classe 1, foram observadas no gráfico de dispersão a existência de sequências de diferentes valores de Chl-a IVF para valores de razão de bandas idênticos (Figura 4.19a). Considerando que a classe 2 representa uma área de transição da região com maior Chl-a, nesta área existiria uma maior mudança nas características ópticas da água, dificultando o ajuste de um modelo linear (Figura 4.19b). Ainda assim, destaca-se novamente a dificuldade de compatibilização entre os dados espectrais obtidos pelo sensor MODIS com a Chl-a IVF.

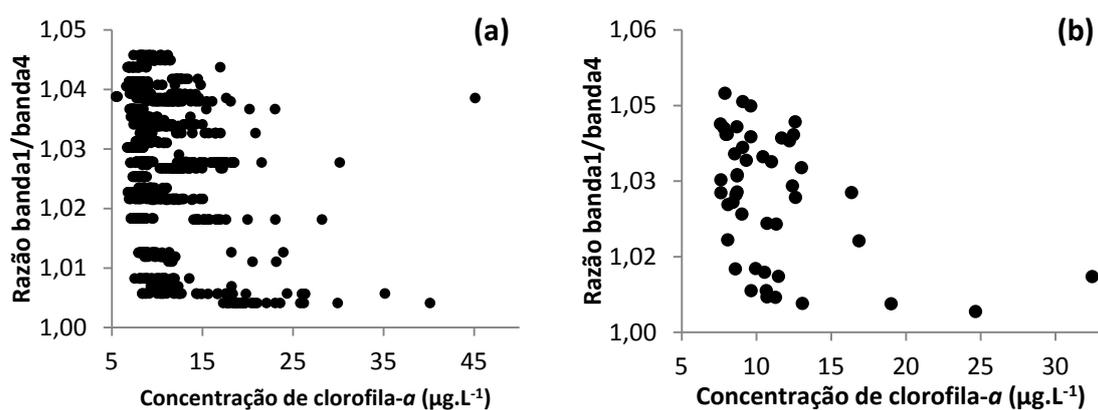


Figura 4.19 - Ajuste entre a razão banda1/banda4 e os valores brutos de Chl-a IVF (a) e médios (b) para os pixels da classe 2.



## 5 CONCLUSÕES

As análises realizadas neste trabalho permitem concluir que:

- O emprego da espectroscopia de fluorescência para medidas realizadas em fluxo contínuo possui grande potencial de aplicação, à medida que aumenta o número de amostras estimadas. Entretanto, a técnica deve ser utilizada com cautela em regiões onde as características ópticas da água são bastante diversificadas, caso da planície de inundação pesquisada neste trabalho;
- Não foi possível obter um modelo global para estimar a concentração de clorofila-a nos transectos amostrados na planície do LGC, tendo em vista a existência de ambientes com características ópticas totalmente distintas dentro da própria planície;
- Dentre as variáveis que interferem na IVF analisadas neste estudo, o TSS apresentou a maior influência, sugerindo que quando a razão  $Chl-a/TSS < 0,001$ , não é possível obter um bom ajuste do modelo. Este resultado converge com os relatos recentes na literatura (Lobo et al., 2011);
- Apesar do bom ajuste no modelo para estimar a Chl-a nos transectos amostrados no lago Grande do Curuai ( $R^2=0,94$ ,  $p < 10^{-5}$ ), não foi possível relacionar estes resultados com as imagens MODIS. Este resultado indica que a imagem MODIS não foi eficiente para detectar as variações de clorofila na água, devido às características do sensor (baixa resolução espacial e espectral);
- Outro fator que pode interferir na compatibilidade entre os dados de satélite e a Chl-a IVF deve-se aos procedimentos experimentais em campo. Como a tomada de água para a determinação de clorofila estava abaixo da superfície da água e existia a presença de florações em

superfície, a Chl-a obtida através da fluorometria pode ter sido subestimada em relação à observada pelo satélite.

À luz dos resultados obtidos, recomenda-se para estudos futuros:

- Testar um conjunto óptico (lâmpada e filtros) mais específico no processo de amostragem da IVF, tal como sugerido por Welshmeyer (1993);
- Adotar um novo desenho amostral, que contemple um número maior de amostras para cada tipo de ambiente opticamente distinto;
- Ampliar o número de repetições de medidas em um mesmo ponto quando o objetivo for avaliar o desempenho do fluorômetro operando em fluxo contínuo;
- Coletar dados de irradiância solar no momento da realização das medidas fluorométricas *in situ*, de forma a avaliar a influência deste parâmetro na fluorescência da clorofila;
- Utilizar imagens com melhor resolução espectral e espacial (sensor MERIS ou sensores hiperespectrais), visando obter maior riqueza de informações espectrais das imagens.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. R.; POWELL, T. M.; RICHERSON, P. J. The relationship of environmental variability to the spatial patterns of phytoplankton biomass in Lake Tahoe. **Journal of Plankton Research**, v. 4, n. 4, p. 927-941, 1982.

ALVES, M. A. S.; MACHADO, L. A. T.; PRASAD, G. S. S. D. Estudo da variabilidade da cobertura de nuvens altas na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 1, p. 71-80, 2007.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination for water and wastewater**. 19.ed. Washington DC: APHA, 1995. 1100p.

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

BABIN, M.; MOREL, A.; GENTILI, B. Remote sensing of sea surface sun-induced chlorophyll fluorescence: consequences of natural variations in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll a fluorescence. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 12, p. 2417-2448, 1996.

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/Rio Amazonas**. 2005. 286 p. (INPE-14614-TDI/1193). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/02.22.15.03>>. Acesso em: 07 jan. 2011.

BONNET, M.P. et al. Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí). **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 1/2, p. 18-30, 2008.

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.; BRUTON, J.; JEROME, J. Use of chromaticity in remote measurements of water quality. **Remote Sensing of Environment**, v. 177, p. 161-177, 1983.

CARLSON, R. E.; SHAPIRO, J. Dissolved humic substances: a major source of error in fluorometric analyses involving lake waters. **Limnology and Oceanography**, v. 26, n. 4, p. 785-790, 1981.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo 2010**. São Paulo, 2011. 298 p. Série Relatórios. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em: 08 nov. 2011.

DEKKER, A. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993. 222 p. Tese (Faculty of Arts) – Proefschrift Vrije Universiteit, Amsterdam, 1993.

FERREIRA, R. D. et al. Avaliação do sensor hiperespectral SpecTIR na discriminação de diferentes concentrações de clorofila-a no Reservatório de Ibitinga-SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 8652-8659. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/3A54QPP>>. Acesso em: 09 abr. 2012.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p.

GIARDINO, C. et al. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 2, p. 183-195, 2007.

GIBBS, C. Chlorophyll b interference in the fluorometric determination of chlorophyll a and 'phaeo-pigments'. **Marine and Freshwater Research**, v. 30, n. 5, p. 597–606, 1979.

GITELSON, A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration . **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3367-3373, 1992.

GITELSON, A. A. et al. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, v. 9, p. 3582-3593, 2008.

GITELSON, A. A.; SCHALLES, J. F.; HLADIK, C. M. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 4, p. 464-472, 2007.

GOODIN, D. G. et al. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 59, n.4, p. 505-510, 1993.

GOWER, J. F. R.; DOERFFER, R.; BORSTAD, G. A. Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 9, p. 1771-1786, 1999.

GURLIN, D.; GITELSON, A. A.; MOSES, W. J. Remote estimation of chl-a concentration in turbid productive waters - return to a simple two-band NIR-red model?. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3479-3490, 2011.

HARRIS, G. P. The relationship between chlorophyll a fluorescence, diffuse attenuation changes and photosynthesis in natural phytoplankton populations. **Journal of Plankton Research**, v. 2, n. 2, p. 109, 1980.

HEANEY, S. Some observations on the use of the in vivo fluorescence technique to determine chlorophyll-a in natural populations and cultures of freshwater phytoplankton. **Freshwater Biology**, v. 8, n. 2, p. 115–126, 1978.

HUNTER, P. D. et al. Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2705-2718, 2010.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 672 p.

JUNK, W. J. **Central Amazon floodplain**: ecology of a pulsing system. New York: Springer, 1997. 548 p.

JUNK, W. J. Long-term environmental trends and the future of tropical wetlands. **Environmental Conservation**, v. 29, n. 4, p. 414-435, 2002.

KELLER, A. A.; RICE, R.L. Variation in DCMU-enhanced fluorescence relative to chlorophyll a: correlation with the brown tide bloom. **Journal of Phycology**, v. 26, n. 1, p. 202-205, 1990.

KIEFER, D. A. Chlorophyll a fluorescence in marine centric diatoms: responses of chloroplasts to light and nutrient stress. **Marine Biology**, v. 22, n. 3, p. 39-46, 1973.

KIEFER, D. A. Fluorescence properties of natural phytoplankton populations. **Marine Biology**, v. 22, n. 3, p. 263–269, 1973.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2.ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1994. 528 p.

KUTNER, M. H. et al. **Applied linear statistical models**. 5.ed. New York: McGraw-Hill, 2004. 1396 p.

KUTSER, T. Passive optical remote sensing of cyanobacteria and other intense phytoplankton blooms in coastal and inland waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 4401-4425, 2009.

LE, C. et al. A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: the case of Taihu Lake, China. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 6, p. 1175-1182, 2009.

LOBO, F. L. et al. Reference spectra to classify Amazon water types. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 11, p. 3422-3442, 2011.

LOBO, F. L. et al. Mapping potential cyanobacterial bloom using Hyperion/EO-1 data in Patos Lagoon estuary. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 21, n. 3, p. 299-308, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/plutao@80/2009/12.22.15.56.40>>. Acesso em: 09 abr. 2012.

LODHI, M.; RUNDQUIST, D.; HAN, L. The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface waters. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, n. 1, p. 111-117, 1997.

LORENZEN, C. J. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. **Deep Sea Research**, v. 13, n. 2, p.223–227, 1966.

MANTOVANI, J. E.; NOVO, E. M. L. M. Comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. (SBSR), 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 917-924. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6164-PRE/2253). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.09.35>>. Acesso em: 09 abr. 2012.

MATTHEWS, M. W.; BERNARD, S.; WINTER, K. Remote sensing of cyanobacteria dominant algal blooms and water quality parameters in Zeekoevlei, a small hypertrophic lake, using MERIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n.9, p. 2070–2087, 2010.

MOBLEY, C. D. **Light and water: radiative transfer in natural waters**. London: Academic Press, 1994. 592 p.

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

MOSES, W. J. et al. Estimation of chlorophyll- a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data-successes and challenges. **Environmental Research Letters**, v. 4, n. 4, p. 045005, 2009.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **MODIS web site**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: 21 de jun. 2011.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3.ed. São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

NOVO, E. M. L. M. et al. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Limnology**, v. 7, n. 3, p. 153-161, 2006.

NUSCH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. **Archiv für Hydrobiologie Beiheft**, v. 14, 1980.

ODERMATT, D.; GIARDINO, C.; HEEGE, T. Chlorophyll retrieval with MERIS Case-2-Regional in perialpine lakes. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 3, p. 607-617, 2010.

PAPAGEORGIU, G. C.; GOVINDJEE. **Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis**. Dordrecht: Springer, 2004. 820 p.

REYNOLDS, C.S. **Ecology of phytoplankton**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 535p.

RUDORFF, C. M.; GALVAO, L. S.; NOVO, E. M. L. M. Reflectance of floodplain waterbodies using EO-1 Hyperion data from high and receding flood periods of the Amazon River. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 10, p. 2713-2720, May 2009. doi: <10.1080/01431160902755320>.

RUNDQUIST, D. C. et al. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, n. 2, p. 195-200, 1996.

SATHYENDRANATH, S. **Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters**. Dartmouth: International Ocean-Colour Coordinating Group, 2000. 140p. Disponível em: <[www.ioccg.org/reports/report3.pdf](http://www.ioccg.org/reports/report3.pdf)>. Acesso em: 26 abr. 2010.

SHEN, F. et al. Medium resolution imaging spectrometer (MERIS) estimation of chlorophyll- a concentration in the turbid sediment-laden waters of the Changjiang (Yangtze) Estuary. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 17-18, p. 4635-4650, 2010.

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

SOOHOO, J. B. et al. In vivo fluorescence excitation and absorption spectra of marine phytoplankton: I. Taxonomic characteristics and responses to photoadaptation. **Journal of Plankton Research**, v. 8, n. 1, p. 197-214, 1986.

SUGGETT, D. J.; PRASIL, O.; BOROWITZKA, M. A. **Chlorophyll a fluorescence in aquatic sciences: methods and applications**. Dordrecht: Springer, 2010. 323 p.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. 2.ed. São Carlos: RIMA, 2005. 260 p.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631 p.

TUNZI, M. G.; CHU, M. Y.; BAIN JR, R. C. In vivo fluorescence, extracted fluorescence, and chlorophyll concentrations in algal mass measurements. **Water Research**, v. 8, n. 9, p. 623–635, 1974.

TURNER DESIGNS. **Advantages of fluorescence**. 2008. Disponível em: <[http://www.turnerdesigns.com/t2/doc/appnotes/998\\_0050/0050\\_c2.html](http://www.turnerdesigns.com/t2/doc/appnotes/998_0050/0050_c2.html)>. Acesso em: 20 fev. 2011.

TURNER DESIGNS. **Instrumentation**. 2008. Disponível em: <[http://www.turnerdesigns.com/t2/doc/appnotes/998\\_0050/0050\\_c2.html](http://www.turnerdesigns.com/t2/doc/appnotes/998_0050/0050_c2.html)>. Acesso em: 20 fev 2011.

VASILKOV, A.; KOPELEVICH, O. The reasons of maximum at about 700 nm on radiance spectra of the sea. **Oceanology**, v. 22, p. 945-950, 1982.

VYHNÁLEK, V. et al. *In vivo* fluorescence of chlorophyll a: estimation of phytoplankton biomass and activity in Rímov reservoir (Czech Republic). **Water Science Technology**, v. 28, n. 6, p. 29-33, 1993.

WELSCHMEYER, N. A. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheopigments. **Limnology and Oceanography**, v. 39, n. 8, p. 1985–1992, 1994.

WETZEL, R. G.; LIKENS, G. E. **Limnological analyses**. 2.ed. New York: Springer-Verlag, 1991. 391 p.

WINDMILL SOFTWARE. (2011). **Windmill web site**. Disponível em: <<http://www.windmillsoft.com/>>. Acesso em 03 jun 2011.

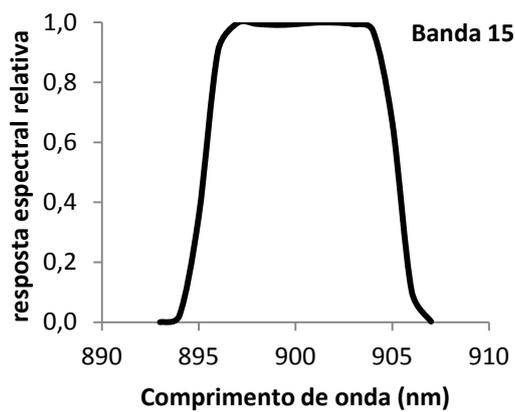
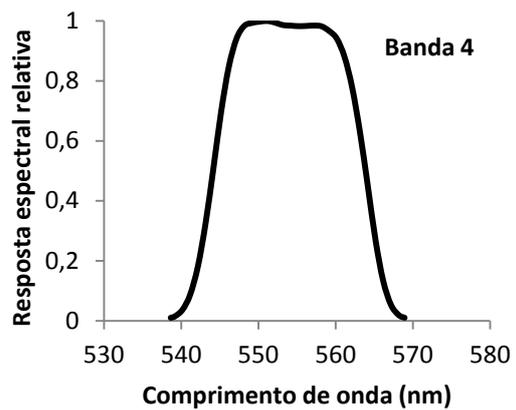
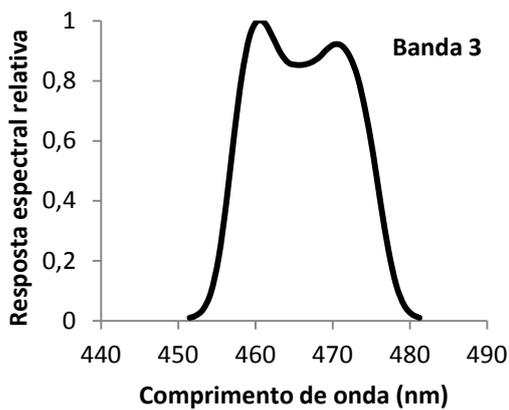
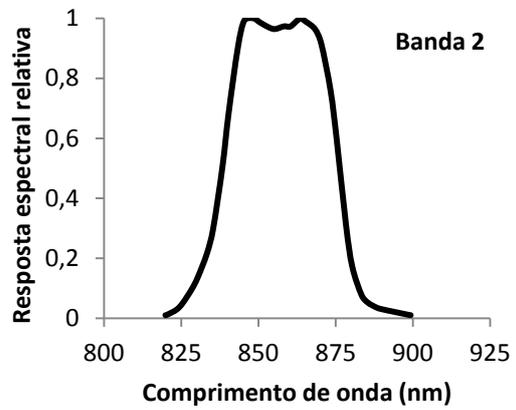
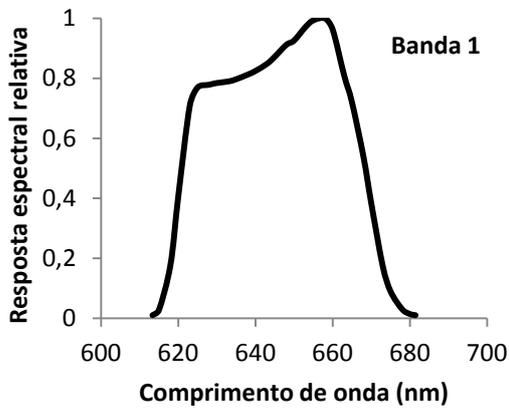
WITTE, W. G. et al. Influence of dissolved organic materials on turbid water optical properties and remote-sensing reflectance. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n.1, p. 441-446, 1982.

YENTSCH, C.; PHINNEY, D. Spectral fluorescence: an ataxonomic tool for studying the structure of phytoplankton populations. **Journal of Plankton Research**, v. 7, n. 5, p. 617-632, 1985.

ZIBORDI, G. et al. Autonomous above-water radiance measurements from an offshore platform: A field assessment experiment. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 5, p. 808-819, 2002.



**APÊNDICE A – Gráficos com as funções de resposta espectral (bandas 1 a 4) do sensor MODIS.**





## APÊNDICE B – Variáveis amostradas na campanha de campo

Pontos	Localização	Data	Horário	IVF	Chl-a (µg/L)	Feofitina (µg/L)	CTD (mg/l)	CID (mg/l)	COD (mg/l)
P1	Preguiça	5/4	15:59	40,74	6,12	11,87	8,03	4,01	4,02
P2		5/4	16:28	34,03	5,09	7,16	8,05	4,31	3,74
P3	Maripá	6/4	9:23	24,05	4,12	6,17	8,39	4,43	3,96
P5		6/4	12:02	26,97	3,42	11,66	9,43	4,16	5,27
P6	Amaral	6/4	14:10	25,13	2,79	6,88	10,21	4,58	5,63
P7	Irateuá	6/4	15:34	26,43	5,13	4,24	13,62	5,31	8,31
P8		6/4	16:28	25,39	4,97	6,76	10,74	4,85	5,89
P9	Poção	7/4	9:52	24,42	5,03	4,97	9,99	4,89	5,10
P10		7/4	11:59	24,58	2,67	5,33	8,91	4,45	4,46
P11		7/4	13:16	25,93	4,29	6,22	7,94	4,20	3,75
P12		7/4	14:31	25,45	6,40	4,44	7,59	4,21	3,38
P13	Preguiça	7/4	15:40	28,61	7,45	9,61	8,58	4,19	4,40
P14		7/4	16:49	24,70	8,61	4,54	7,85	4,65	3,20
P15	Guariba	8/4	9:55	27,94	9,10	5,30	7,81	3,85	3,96
P16		8/4	10:48	27,96	10,08	4,78	7,76	4,01	3,75
P17		8/4	12:30	30,93	14,59	5,85	7,67	4,56	3,11
P18		8/4	13:56	24,19	7,48	5,01	8,70	4,83	3,87
P19	Grande do Curuai	9/4	07:12	29,30	30,84	6,00	7,67	4,11	3,57
P20		9/4	8:43	20,25	11,72	4,60	7,62	3,59	4,03
P21		9/4	10:10	24,23	16,31	3,19	7,08	3,16	3,92
P22		9/4	12:34	22,57	14,63	8,06	6,86	2,89	3,97
P23		9/4	15:58	29,94	25,87	3,56	6,68	3,30	3,38
P24		10/4	8:16	19,77	7,22	0,91	7,04	3,17	3,87
P25		10/4	9:21	20,05	7,68	3,48	7,24	3,88	3,36
P26		10/4	10:33	20,02	9,16	2,11	7,81	4,34	3,47
P27		10/4	11:57	21,33	9,98	3,58	7,40	4,13	3,27

Pontos	TSS extraído (mg/l)	TSS estimado (µg/L)	Temp. (oC)	Cond. (µS)	OD (mg/L)	pH	Turbidez	Prof. (m)	Secchi (cm)
P1	14,60	16,80	31,53	57	7,21	7,5	30,2	-	-
P2	-	14,92	31,15	58	7,88	7,6	27,7	-	-
P3	-	12,04	29,32	57	9,92	6,9	23,4	-	-
P5	-	10,91	30,84	57	11,36	7,4	21,5	4,1	-
P6	-	6,39	30,38	-	8,40	6,8	11,5	3,7	-
P7	2,60	4,26	31,5	-	7,40	6,7	1,1	3,8	-
P8	5,00	4,95	32,99	-	10,34	7,2	6,1	5,0	-
P9	5,90	6,77	29,8	-	6,30	6,8	12,6	5,1	50
P10	-	8,90	30,98	60	7,09	7,3	17,7	5,5	45
P11	16,70	20,31	30,49	57	7,06	7,2	34,4	5,2	30
P12	-	12,04	30,45	58	7,40	7,5	23,4	5,4	40
P13	15,50	15,36	30,99	57	7,30	7,2	28,3	5,6	35
P14	-	7,73	30,6	60	6,62	7,0	15,1	4,7	50
P15	19,20	21,20	29,32	55	7,01	7,1	35,4	5,5	30
P16	-	26,68	29,37	54	7,05	7,1	41,0	5,3	30
P17	-	24,93	30,22	57	7,38	7,3	39,3	5,6	30
P18	-	6,52	30,29	64	6,51	7,2	11,9	4,8	40
P19	-	7,61	30	52	5,31	6,6	14,8	5,8	50
P20	6,70	7,10	29,71	48	7,15	7,1	13,5	5,9	55
P21	-	8,16	30,08	44	7,26	7,1	16,1	5,5	50
P22	8,80	6,98	30,96	38	7,32	7,0	13,2	5,1	50
P23	16,30	11,31	31,19	53	10,06	8,7	22,2	5,9	45
P24	7,73	7,14	29,68	56	7,94	7,4	13,6	6,3	60
P25	7,53	7,33	30,3	59	8,06	7,4	14,1	6,0	55
P26	8,40	8,16	30,14	61	7,72	7,4	16,1	5,3	50
P27	-	8,08	30,41	59	7,74	7,4	15,9	8,0	50

Conforme apresentado pela Figura B.1, foi encontrado um bom ajuste para o modelo de conversão, permitindo estimar o TSS para as estações nas quais não houve coleta de água para esta análise em laboratório.

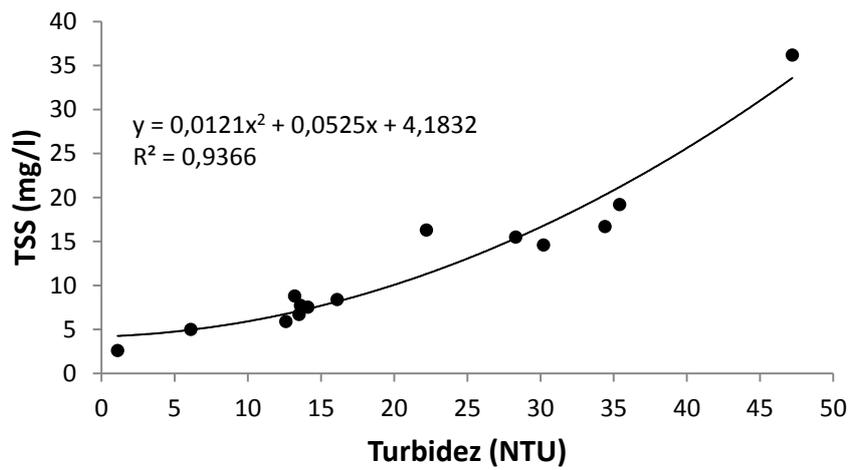


Figura B.1 - Modelo de regressão relacionando TSS e turbidez.