



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/09.13.07.48-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE SISTEMAS  
FRONTAIS SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA DO  
RESERVATÓRIO DE ITUMBIARA, GO, UTILIZANDO  
DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS *IN  
SITU***

Gabriel Moiano Cesar

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Milton Kampel, e José Luiz Stech, aprovada em 21 de  
setembro de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3AE5R32>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

**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:**

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

**Membros:**

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

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

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**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:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/09.13.07.48-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE SISTEMAS  
FRONTAIS SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA DO  
RESERVATÓRIO DE ITUMBIARA, GO, UTILIZANDO  
DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS *IN  
SITU***

Gabriel Moiano Cesar

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Milton Kampel, e José Luiz Stech, aprovada em 21 de  
setembro de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3AE5R32>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Cesar, Gabriel Moiano.

C334c

Caracterização da influência de sistemas frontais sobre a qualidade da água do reservatório de Itumbiara, GO, utilizando dados de sensoriamento remoto e dados *in situ* / Gabriel Moiano Cesar. – São José dos Campos : INPE, 2011.

xxiv+81 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/09.13.07.48-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Milton Kampel, e José Luiz Stech.

1. MODIS. 2. Boia SIMA. 3. Limnologia. 4. Frente fria. 5. Reservatório tropical. I. Título.

CDU 528.8

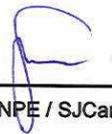
---

Copyright © 2011 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 © 2011 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

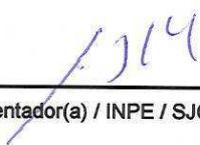
Dra. Evilyn Marcia Leão de Moraes Novo



---

Presidente / INPE / SJC Campos - SP

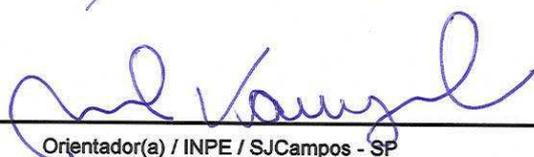
Dr. José Luiz Stech



---

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

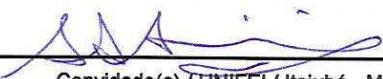
Dr. Milton Kampel



---

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu



---

Convidado(a) / UNIFEI / Itajubá - MG

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

Aluno (a): Gabriel Moiano Cesar

São José dos Campos, 21 de setembro de 2011



“Não tenho vergonha de mudar de opinião porque não tenho vergonha de pensar”

(Blaise Pascal)



Dedico a minha mãe.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus orientadores Dr. Milton Kampel e Dr. José Luiz Stech, pela orientação, compreensão e incentivo na realização deste trabalho.

A minha grande amiga Aline de Mattos por toda ajuda e por todas as ideias que me inspiraram.

Aos amigos Luciana Arasato, Eduardo Gigliotti, Natália Rudorf, Ana Lia Lopes e Gabriel Pereira pela ajuda e pelo companheirismo.

À Sydnea Maluf pela companhia e apoio que me deu durante o período do mestrado.

À Dra Silvana Kampel, pela ajuda com o texto.

Ao Dr. Enner Alcântara e a Msc. Renata Nascimento por cederem os dados dos trabalhos de campo.

A minha mãe por todo o amor e carinho.

A todos os funcionários do INPE.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante os anos de estudo.

A todos que acreditaram em mim, muito obrigado!



## RESUMO

Além das ações humanas a qualidade da água em reservatórios é influenciada por forçantes meteorológicas e climáticas que condicionam variações espaciais e temporais nestes sistemas. Técnicas convencionais de monitoramento da qualidade da água requerem grandes investimentos de recursos e tempo para a coleta de informações. Pela possibilidade de visão sinóptica de extensas áreas e alta frequência temporal, dados de sensoriamento remoto são uma alternativa para estimar parâmetros de qualidade de água, desde que as relações entre as imagens, fatores meteorológicos e climáticos sejam conhecidos e parametrizados corretamente. Este trabalho avaliou a influência de fatores meteorológicos sobre a qualidade da água do reservatório de Itumbiara, GO, por meio de dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e dados coletados *in situ*. Durante o período de setembro de 2009 até março de 2011 foram descritos os eventos de frente fria: os meses de maio e agosto foram os que registraram a maior média da quantidade de eventos frontais (2 - 3) e o mês de novembro registrou frentes frias de maior duração. Com as variáveis estimadas por meio das imagens de satélite fez-se uma análise da compartimentação do reservatório, dividindo-o em três compartimentos: o corpo principal do reservatório, os braços dos rios Corumbá e Paranaíba e uma terceira região sob influência das águas do rio Araguari. No período de seca, o reservatório apresenta domínio de matéria orgânica dissolvida. A maior mistura vertical no reservatório de Itumbiara foi observada para o inverno, conforme resultado da técnica de Estabilidade Relativa da Coluna d'água. Adicionalmente, foram observados as variações sazonais e os efeitos da passagem de frentes frias sobre os parâmetros limnológicos do Reservatório. Dados de sensoriamento remoto contribuem para a descrição das forçantes meteorológicas na dinâmica de reservatórios, produzindo conhecimento útil para o planejamento de manejo e monitoramento ambiental da qualidade de suas águas.



# CHARACTERIZATION OF FRONTAL SYSTEMS INFLUENCE ON WATER QUALITY OF ITUMBIARA RESERVOIR, GO, BRAZIL, USING REMOTE SENSING AND IN SITU DATA

## ABSTRACT

In addition to human activities the water quality in reservoirs is influenced by weather and climate forcings that determine spatial and temporal variations in these systems. Conventional techniques for water quality monitoring require large time and fund investments. The synoptic view of large areas and high temporal frequency remote sensing data provides are an alternative way to estimate water quality parameters, since the relations between images data and meteorological factors are properly known. This work has evaluated the influence of meteorological factors on water quality of Itumbiara reservoir (Goiás state, Brazil), using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data and water parameters collected *in situ*. During the period of September 2009 until March 2011 the cold front events were described: the months of May and August were the ones that recorded the highest average of the quantity of front events (2 - 3) and the month of November has longest cold fronts. From compartmentalization analysis based on satellite images, the reservoir was divided in: the main body of the reservoir, the Corumbá and Paranaíba tributaries and a third region under the influence of the Araguari river water. During the drought period, colored dissolved organic matter dominated the reservoir water. From the technique of Relative Water Column Stability, the largest vertical mixing in the Itumbiara reservoir was observed for the winter. Additionally, it was observed the seasonal variations and the effects of cold fronts passage over the limnological parameters of the reservoir. Remote sensing data contributed to describe the weather factors related to the dynamics of reservoirs, producing useful knowledge for management and environmental monitoring planning of water quality.



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 - Esquema do funcionamento de um Sistema Frontal. Fonte: Adaptado de Massambani; Ambrizzi (2005)	7
Figura 3.1 - Localização do Reservatório de Itumbiara em Goiás, Brasil (a), Contexto estadual (b) Em escala regional (c) Imagem ETM Landsat 7 de 02-04-2002, composição falsa cor 4(R), 5(G) e 6(B), mostrando a área inundada do reservatório	14
Figura 3.2 - (a) Imagem MSS-Landsat-3 de 11-08-1978 mostrando a área de estudo antes da inundação; e (b) Imagem ETM-Landsat-7 de 02-04-2002, mostrando o reservatório inundado, ambas em composição cor verdadeira	16
Figura 3.3 - Variabilidade sazonal da chuva em Itumbiara, representada pelas chuvas médias mensais no período de 1961 a 1990. Fonte: <a href="http://www.tempoagora.com.br">http://www.tempoagora.com.br</a>	17
Figura 3.4 - Variabilidade sazonal da temperatura em Itumbiara, representada pelas temperaturas mínimas e máximas mensais no período de 1961 a 1990. fonte: <a href="http://www.tempoagora.com.br">http://www.tempoagora.com.br</a>	19
Figura 3.5 - Variação média diária (2003-2008) do nível da água no Reservatório. Fonte: Adaptado de Alcântara (2010).	19
Figura 3.6 - Foto da boia SIMA instalada no reservatório de Itumbiara. Fonte: Alcântara et al.,2010	22
Figura 3.7 - Imagens GOES 12 do dia 10 de junho de 2010 indicando a passagem de um sistema frontal. Os registros foram feitos em (A) 2h; (B) 4h; (C) 6h; (D) 8h; (E) 10h; (F) 12h. As setas mostram o local do reservatório	25
Figura 3.8 - Localização dos 30 pontos aleatórios selecionados no reservatório de Itumbiara para a extração de valores de reflectância e análise de agrupamento de massas de água sob influência de sistemas frontais.	26
Figura 4.1 - Em azul as anomalias positivas de total precipitado. Em vermelho o espaço de tempo no qual não houve precipitação	32

Figura 4.2 -	Em vermelho as anomalias positivas de total precipitado e os dias iniciais dos eventos de frente fria (azul).	33
Figura 4.3 -	Tempo médio em dias decorrido entre os eventos de frente fria	34
Figura 4.4 -	Média mensal do número de frentes frias observadas em Itumbiara, durante o período de setembro de 2009 a março de 2011	35
Figura 4.5 -	Tempo médio em dias decorrido entre os eventos de frente fria, durante o período de setembro de 2009 a março de 2011.	37
Figura 4.6 -	Média mensal da duração (dias) dos eventos frontais, durante o período de setembro de 2009 a março de 2011	38
Figura 4.7 -	Seqüência de imagens classificadas com o K-médias do período entre os dias 10 e 14 de junho de 2010.	40
Figura 4.8 -	Seqüência de imagens classificadas com o K-médias do período entre os dias 20 e 22 de setembro de 2010.	41
Figura 4.9 -	Comparação entre os valores de clorofila estimados de antes e depois da passagem das frentes frias.	45
Figura 4.10 -	Comparação entre os valores de turbidez estimados de antes e depois da passagem das frentes frias.	46
Figura 4.11 -	Variação das concentrações de nitrato (A), amônia (B) e pH (C) medidos pela boia SIMA. O período de ocorrência da frente fria está marcado na série.	49
Figura 4.12	Imagens médias 8 dias MODIS do período entre os dias 2 - 9 de fevereiro de 2010 (A e B); e imagem MODIS do período entre os dias 18 - 25 de junho de 2010 (C e D). Foi utilizada a composição R(7) G(2) B(1) para as imagens da esquerda, A e C; e as imagens da direita, B e D, têm composição R(1) G(4) B(3).	53
Figura 4.13 -	Comparação dos valores estimados para a variável turbidez obtidos com a razão entre as bandas 2 (841-876 nm) no infravermelho - próximo e 1 (620-670 nm) na região do vermelho para definição de regiões no reservatório de Itumbiara. Os valores utilizados são da série temporal de imagens MODIS (composição de 8 dias).	54
Figura 4.14 -	Comparação dos valores estimados para a variável clorofila obtidos com a razão entre as bandas 3 (459-	55

479 nm) e 4 (545-565 nm) para definição de regiões no reservatório de Itumbiara. Os valores utilizados são da série temporal de imagens MODIS (composição de 8 dias).

- Figura 4.15 - Série da Estabilidade Relativa da Coluna D'água (RWCS) próximo à barragem, do período de janeiro de 2010 a julho de 2010. 57
- Figura 4.16 - Variação temporal da temperatura (°C) da coluna d'água no reservatório de Itumbiara medida pela boia SIMA no período entre janeiro e julho de 2010. 58
- Figura 4.17 - Série da resistência relativa térmica (RTRM) próximo à barragem, do período de janeiro de 2010 a julho de 2010. 59
- Figura 4.18 - Relação entre a temperatura em 5 metros de profundidade e a estabilidade relativa da coluna d'água, com os dados da boia SIMA para o período entre janeiro de 2010 e julho de 2010. 59
- Figura 4.19 - Média dos valores de reflectância dos *endmembers* selecionados para a série de imagens. O eixo X representa o comprimento de onda (nm) das amostras e o eixo Y representa a média das respostas espectrais dos COA: MOD (matéria orgânica dissolvida colorida), MPI (Material particulado inorgânico em suspensão) e CLO (clorofila). 60
- Figura 4.20 - Imagens fração e composição colorida da imagem média 8 dias MODIS de 14-21 de abril de 2010. (A) Abundância de MOD, (B) CLO, (C) MPI e (D) composição colorida R(A) G(B) B(C). 61
- Figura 4.21 - Classificação por fatiamento da fração MPI gerada pelo MLME da imagem média de 8 dias de 14-21 de abril de 2010. 63
- Figura 4.22 - Quantidade de pontos com contribuição maior do que 80 % das imagens fração geradas pelo MLME aplicado à série de imagens médias de 8 dias de setembro de 2009 à março de 2011. 63
- Figura 4.23 - Diagramas triangulares indicando a contribuição dos COA para os períodos de (A) seca e (B) cheia para a série temporal de valores estimados com o MLME aplicados nas imagens médias de 8 dias. 64



## LISTA DE TABELAS

	Pág.	
Tabela 3.1	Principais características do reservatório de Itumbiara	15
Tabela 3.2 -	Características principais das sete bandas MODIS-Aqua(prodoto MYD09) utilizadas no presente trabalho	21
Tabela 4.1 -	Quantidade de eventos associados aos sistemas frontais analisados no período de estudo	31
Tabela 4.2 -	Informações sobre os sistemas frontais observados nos períodos de inverno e verão para a série estudada durante o período de setembro de 2009 a março de 2011	38
Tabela 4.3 –	Validação dos dados estimados pela razão de bandas com dados <i>in situ</i> . Valores em negrito: coeficientes de determinação significativos ao nível de 95%.	43
Tabela 4.4 -	Valores (normalizados) máximo, médio e mínimo dos parâmetros limnológicos medidos pela boia SIMA antes e depois da passagem das frentes frias.	46



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANOVA – Análise de Variância  
CLO – Clorofila  
COA - Componente Opticamente Ativo  
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
ENSO - *El Niño Southern Oscillation*  
ENVI - *Environment for Visualizing Images*  
EOS - *Earth Observing System*  
EOSDIS - *Earth Observing System Data and Information System*  
EMQ – Erro Médio Quadrático  
ETM - *Enhanced Thematic Mapper Plus*  
GOES - *Geostationary Operational Environmental Satellite*  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
LANDSAT - *Land Remote Sensing Satellite*  
MLME - Modelo Linear de Mistura Espectral  
MNF - *Minimum Noise Fraction*  
MOD - Matéria Orgânica Dissolvida Colorida  
MPI – Material Particulado Inorgânico  
MRT - *MODIS Reprojection Tool*  
MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*  
MSS - *Multispectral Scanner Subsystem*  
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*  
NTU - *Nephelometric Turbidity Unit*  
OD - Oxigênio Dissolvido  
PCD - Plataforma de Coleta de Dados  
POI - Propriedades Ópticas Inerentes  
RWCS - *Relative Water Column Stability*  
RTR - Resistência relativa térmica  
SEPLAN - Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SIMA - Sistema Integrado de Monitoração Ambiental

SPRING - Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas

UNIVAP - Universidade do Vale do Paraíba

WIST - *Warehouse Inventory Search Tool*

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo Geral.....	3
1.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Forçantes meteorológicas .....	5
2.2 Características dos Sistemas Frontais.....	6
2.3 Efeitos da passagem de frentes frias na qualidade das águas de reservatórios .....	8
2.4 Componentes Opticamente Ativos (COA) .....	9
2.5 Modelo de Mistura Espectral.....	10
2.6 Classificação não supervisionada.....	11
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
3.1 Área de Estudo.....	13
3.1.1 Caracterização climatológica e hidrológica da área de estudo.....	15
3.2 Dados Orbitais.....	19
3.3 Dados da boia SIMA .....	20
3.4 Dados da PCD Itumbiara.....	22
3.5 Dados de Reanálise .....	22
3.6 Dados de Campanhas de Campo.....	22
3.7 Identificação de Sistemas Frontais .....	23
3.8 Análise espectral de massas de água sob a influência de sistemas frontais .....	24
3.9 Análise de parâmetros de qualidade da água sob influência de sistemas frontais.....	25
3.10 Análise de compartimentação do reservatório.....	26
3.11 Análise vertical da coluna de água .....	26
3.12 Caracterização bio-óptica por sensoriamento remoto.....	27
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>31</b>
4.1 Estatística Básica das Frentes Frias .....	31
4.2 Classificação e Análise de Cluster.....	39

4.3 Razão de bandas.....	42
4.4 Análise da qualidade da água do reservatório de Itumbiara sob o efeito da passagem de sistemas frontais.....	44
4.5 Análise da compartimentação.....	50
4.6 Estabilidade Relativa da Coluna Água.....	56
4.7 Modelo Linear de Mistura Espectral.....	60
4.8 Classificação por Fatiamento.....	62
4.9 Análise da Contribuição Relativa dos COA.....	63
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os reservatórios construídos para a geração de energia elétrica também são utilizados para outros fins. Entre estes, pode-se destacar o abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; a proteção das comunidades aquáticas; a recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; a irrigação de hortaliças, de plantas frutíferas e de locais públicos como parques, jardins, campos de esporte e lazer, onde podem ter contato direto; além da aqüicultura e da atividade de pesca (REBOUÇAS, 2002; GARG; JOTHIPRAKASH, 2008). Para isso, é fundamental que a água atinja os padrões de qualidade em todos os aspectos, pois eles são determinantes no processo de crescimento de organismos como algas e bactérias que são prejudiciais para a utilização direta desse recurso (RASK et al., 1998).

Sabe-se que para manter os padrões de qualidade da água, existe a necessidade do monitoramento dos parâmetros que influenciam nos processos físicos, químicos e biológicos das águas dos reservatórios (PAPADIMITRAKIS, 2005).

Vários fatores combinados influenciam na qualidade da água de reservatórios. Dentre esses, pode-se destacar a batimetria, a topografia do entorno do reservatório, as características da bacia de captação, a climatologia (e.g., vento, chuva, energia solar, período do ano), o tipo e a operação do reservatório, o uso e ocupação do solo no entorno e a própria formação do reservatório (WETZEL, 2001).

Existem forçantes naturais que podem mudar significativamente as condições da água nestes reservatórios (STECH et al., 2007; BRANCO et al., 2009; ALCÂNTARA et al., 2010, MORAIS et al., 2010, TUNDISI et al., 2010). Um dos forçantes meteorológicos que tem influência reconhecida na qualidade da água é a passagem de frentes frias. Estes sistemas meteorológicos normalmente mudam as condições de vento, tanto em intensidade como em direção, podendo estar associados a elevados índices pluviométricos. Os sistemas

frontais podem afetar a circulação do reservatório, sua estrutura térmica, impactando o estado trófico do reservatório (ESTEVES, 1988; TUNDISI et al., 2004).

Além de ações antrópicas, o reservatório hidrelétrico de Itumbiara, GO é um exemplo de reservatório onde os processos externos podem afetar a qualidade da água do mesmo. O uso e ocupação do solo na região são principalmente a pecuária e a agricultura, sendo estas atividades realizadas praticamente até junto à margem do corpo d'água, sem que haja proteção por vegetação mais densa. Sabe-se que este tipo de atividade pode trazer problemas para a qualidade da água, por drenagem de produtos agroquímicos, como fertilizantes, pesticidas e matéria orgânica entre outros. Estes problemas podem ser agravados com o aumento da atividade agropecuária uma vez que o reservatório se encontra encaixado em um vale com grande quantidade de pequenos rios e córregos que compõe a bacia de drenagem (NASCIMENTO et al., 2011).

Apesar da grande quantidade de reservatórios brasileiros, ainda existe relativa escassez de trabalhos sobre o monitoramento da qualidade da água em comparação com outros ecossistemas, principalmente com o uso de técnicas de sensoriamento remoto. Nesse aspecto, os dados orbitais representam uma importante ferramenta para esse tipo de estudo, pois disponibilizam dados que facilitam o entendimento de padrões, tendências e interações sobre extensas áreas.

Estudos da variação espacial e temporal da qualidade da água são possíveis com o uso do sensoriamento remoto, pois essa tecnologia permite identificar a gênese e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água (RUDORFF, 2005).

É importante notar que apesar de todas as vantagens do uso do sensoriamento remoto para o monitoramento da qualidade da água, as informações colhidas em campo são essenciais para a pesquisa em monitoramento da qualidade da

água. Além das campanhas convencionais, os dados de boias e plataformas de coleta de dados desempenham um papel fundamental nesse tipo de trabalho.

### **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de frentes frias na qualidade da água do Reservatório de Itumbiara, GO, por meio de dados do sensor MODIS e dados *in situ*, no período de 20/09/2009 a 30/03/2011.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Compilar e analisar estatisticamente séries temporais de parâmetros meteorológicos (e.g. temperatura do ar, pressão barométrica, direção e intensidade do vento) e parâmetros de qualidade da água (e.g. turbidez, clorofila e temperatura da água) da área de estudo;
- adquirir e processar digitalmente uma série temporal de dados orbitais do sensor MODIS referentes ao corpo de água do Reservatório de Itumbiara a fim de definir os padrões de compartimentação observando as variações das propriedades ópticas da água;
- verificar se a passagem de frentes frias altera a qualidade da água do reservatório em questão observando as variáveis clorofila e turbidez estimadas por meio das imagens de satélite e as variáveis limnológicas medidas pela boia SIMA;
- analisar estatisticamente as séries temporais de dados orbitais e *in situ* observando as variações da qualidade da água durante as estações de cheia e seca e variações interanuais.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Forçantes meteorológicas**

Várias forçantes meteorológicas alteram a qualidade da água de reservatórios. O vento persistente (direção e intensidade) pode deslocar horizontalmente águas da borda do reservatório para o seu centro ou borda oposta, causando uma circulação vertical. Isto é, numa parte do reservatório a água da sub-superfície, mais fria, se desloca verticalmente em direção à superfície. E, por continuidade, no outro lado há um mergulho da água de superfície. Esta circulação tem várias conseqüências para a qualidade da água, como o aumento da concentração de sólidos em suspensão e nutrientes (TUNDISI et al., 2004; STECH et al., 2007; PRIMAVESI et al., 2007; PASSERINI, 2010).

Outro importante fator que influencia a qualidade das águas de reservatórios é a precipitação. Ela modifica a circulação de massa, adicionando água fria à superfície do reservatório e às águas das margens. A energia associada ao vento também pode ser responsável pela mistura das massas de água. Esta mistura provoca a elevação dos níveis de turbidez e de concentração de clorofila, associados ao aumento da disponibilidade de nutrientes, ao runoff (aporte continental) e ressuspensão de sedimentos (LEITE, 1998; LIMA et al., 2005; GIFFIN; CORBETT, 2003). Como a água reflete a luz de maneira diferente de acordo com a concentração dos componentes opticamente ativos, espera-se que com eventos de precipitação e ventos persistentes haja um maior aporte de sedimentos para o corpo do reservatório, fazendo com que a reflectância responda de maneira mais acentuada na região do espectro do visível. No caso da ressuspensão de matéria orgânica dissolvida, ocorre o inverso, ou seja, os valores de reflectância se apresentam mais baixos (GIANNINI et al. 2009).

## **2.2 Características dos Sistemas Frontais**

A passagem, formação, ou intensificação de frentes frias são, em geral, associados a mudanças nas condições meteorológicas observadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Antes da chegada de uma frente fria ocorre uma queda na pressão atmosférica, aumento da temperatura do ar e intensificação dos ventos. Após sua passagem, a pressão aumenta, a temperatura diminui e o vento muda de direção (normalmente de norte ou nordeste para de sul ou de sudoeste) (MATTOS, 1986; OLIVEIRA et al., 2001).

Em geral quando o ar quente (úmido) e o ar frio (seco) se encontram há formação de nebulosidade e precipitação (Figura 2.1). O ar quente é mais capaz de reter o vapor d'água que o ar frio, com o resfriamento desse ar, há condensação e precipitação (MASSAMBANI; AMBRIZZI, 2005).

A região centro-sul da América do Sul pode gerar fortes zonas de gradiente termal que propiciam a formação de sistemas frontais. Tal região está situada entre os anticiclones subtropicais do Pacífico e do Atlântico Sul (SATYAMURTY; MATTOS 1989).

Fedorova (1999) observou que nos meses quentes do ano a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) formam-se quando a frente fria se desloca desde o sul e depois a nebulosidade da frente une-se com a nebulosidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Nos meses mais frios a ZCAS estão associadas às frentes frias ou as frentes oclusas, as quais se deslocam desde o sul da América do Sul.

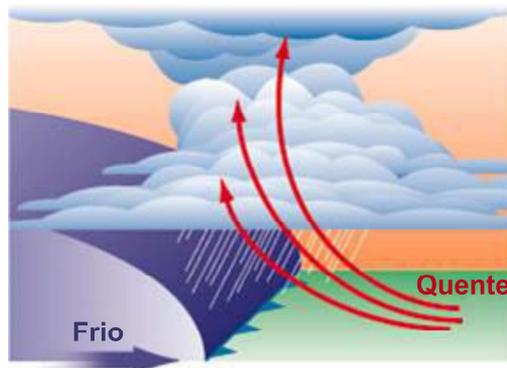


Figura 2.1 - Esquema do funcionamento de um sistema frontal.

Fonte: Adaptado de Massambani; Ambrizzi (2005).

De acordo com Satyamurty et al.(1998) estes sistemas meteorológicos são típicos de latitudes médias, sendo ativos ao longo da costa brasileira em todas as estações do ano. Rodrigues et al. (2004) relataram que uma média de 3 a 4 frentes frias atingem o sul e sudeste do país mensalmente, com um intervalo de 8 dias entre a ocorrências dos fenômenos.

Petterssen (1956) afirma que a frontogênese implica em uma tendência para formação de uma descontinuidade ou intensificação de uma zona de transição já existente (intensificação do sistema frontal). O termo frontólise indica que esta tendência é negativa (enfraquecimento e dissipação do sistema frontal). Mattos (1987) define frontogênese como o processo pelo qual o gradiente horizontal de densidade ou de temperatura é intensificado.

Alguns autores descrevem a região ao norte de 20°S como uma região de frontólise. A partir desta faixa encontra-se a região onde se inicia o processo de dissipação dos sistemas frontais (DAMETTO; ROCHA, 2006; ANDRADE, 2005; OLIVEIRA; NOBRE, 1986). Da mesma forma, Mattos (1987) observa que os sistemas frontais dificilmente conseguem atravessar a região norte logo acima do estado de São Paulo e quando isso acontece, logo se dissipam.

### **2.3 Efeitos da passagem de frentes frias na qualidade das águas de reservatórios**

Com as frentes frias, ocorre uma diminuição da radiação solar incidente e da temperatura do ar, aumento da velocidade do vento e, ao longo de um período de alguns dias, podem ocorrer fenômenos transitórios, tais como ventos fortes e chuvas abundantes. Estes agentes desestabilizam a coluna d'água (TUNDISI et al., 2010). A intensidade do vento também é um fator que afeta a dinâmica do material particulado em suspensão, turbidez e matéria orgânica. Turbulência direta ou indireta causada pelas forças geradas pelos ventos pode ressuspender sedimentos (THORNTON, 1990).

Em um trabalho realizado no Reservatório de Lajes, Branco et al. (2009) constatou que quando há um resfriamento súbito da superfície, ocorre desestabilização da termoclina com o aprofundamento do epilímnio e um aumento da camada de mistura. Isto pode ser explicado pelo fato de que a troca de calor em reservatórios ocorre mais rapidamente nas camadas superficiais da água do que no fundo. Os autores ainda notaram que as frentes frias causaram diminuição evidente da temperatura da superfície, provavelmente contribuindo para o fenômeno da atelomixia parcial e também, pelo aumento da camada do epilímnio.

De forma similar, foi observado que a passagem de frentes frias no Reservatório de Carlos Botelho (SP), também provoca mistura das águas e quebra na estratificação térmica, pelo resfriamento da superfície da coluna de água. Também foi mostrado que existem fortes interações entre a precipitação, vento e a sucessão sazonal de fitoplâncton (TUNDISI et al., 2004). Segundo os autores, a dinâmica, que é uma característica do ambiente pelágico, é fundamental para a organização espacial e temporal das comunidades fitoplanctônicas. Essas variações na turbulência estabelecem o padrão de sucessão e distribuição espacial dessas comunidades (TUNDISI et al., 2010).

Segundo Thornton (1990), dependendo da duração da frente fria e da intensidade dos ventos, pode ocorrer, raramente, mortalidade de peixes em alguns lagos ou reservatórios rasos de diferentes latitudes.

Todos esses autores demonstram em seus estudos que os eventos frontais são forçantes que juntamente com as variações climáticas afetam de maneira significativa os ecossistemas de água doce em uma ampla gama de latitudes na América do Sul.

#### **2.4 Componentes Opticamente Ativos (COA)**

A água pura tem um comportamento espectral determinado basicamente pelo espalhamento molecular nos comprimentos de onda mais curtos. No caso de águas naturais, a reflectância, também varia em função dos componentes opticamente ativos presentes na água, sendo os principais: sedimentos em suspensão, clorofila e matéria orgânica dissolvida (NOBREGA, 2002).

O fitoplâncton inclui as algas unicelulares clorofiladas e outros organismos microscópicos. A denominação como fitoplâncton é adotada por conveniência, já que o mesmo possui maior influência sobre as propriedades ópticas (KAMPEL; NOVO, 2005). O material em suspensão é definido como todo o material particulado inorgânico não incluso no componente fitoplâncton. Em águas costeiras rasas e rios, a ação dos fluxos e correntes pode trazer sedimentos do fundo para a superfície, modificando significativamente a cor da água. Rios lamacentos, estuários e águas oceânicas influenciadas pela desembocadura de rios são exemplos de regiões onde o material particulado em suspensão desempenha um papel importante na determinação das propriedades ópticas da água. Diferentemente do constituinte clorofila, a influência do material particulado em suspensão está limitada a certas áreas costeiras e corpos de águas interiores. É importante frisar que o termo “material em suspensão” não se aplica a apenas um tipo de material, mas a um grupo de materiais com suas propriedades características individuais. Por exemplo, a areia branca de regiões costeiras, quando em suspensão, terá uma influência

diferente na cor da água do que a argila vermelha em suspensão nas proximidades da foz de um rio (SIPELGAS, 2004; IOCCG, 2000).

Além do material em suspensão deve-se destacar matéria orgânica dissolvida que é um grupo de substâncias dissolvidas, orgânicas, compostas por ácidos húmicos e fúlvicos. Podem ter origem local, por exemplo, da degradação de células e partículas orgânicas, ou podem ser trazidas até uma localidade a partir de uma fonte distante. Por exemplo, rios que fluem dentro de matas fechadas e/ou sobre solos ricos em matéria orgânica acumulam carga de substância amarela em seu curso. Locais onde a substância amarela é acumulada de fontes distantes têm uma concentração maior do que regiões onde a substância amarela é formada localmente. O espectro de absorção de detritos é bem parecido com o espectro de absorção da substância amarela. Por isso, por praticidade, em sensoriamento remoto, esse componente é muitas vezes associado com a componente substância amarela (FERRARI; TASSAN, 1991).

## **2.5 Modelo de Mistura Espectral**

Uma importante ferramenta utilizada no processamento digital de imagens de sensoriamento remoto é o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME). A função de um modelo linear de mistura espectral é separar as contribuições espectrais de cada objeto dentro de um pixel, a partir de um conjunto de componentes puros da imagem (PEREIRA, 1998; SHIMABUKURO et al., 1998)

Piwowar et al. (1998) comentam em seu trabalho que apesar da resolução espacial dos sensores orbitais ter aumentado substancialmente nos últimos anos, a maior parte dos dados coletados apresenta uma característica espectral misturada. Visto que a escala de variação espacial dos fenômenos naturais é freqüentemente maior do que a resolução espacial efetiva dos sensores.

Para a aplicação do MLME, deve-se primeiramente transformar os valores digitais da imagem em valores de reflectância de superfície. Isso é necessário para a geração da imagem fração baseada na reflectância dos componentes que podem ser obtidos diretamente na imagem ou a partir de bibliotecas espectrais. Também, contribuem à mistura do sinal, principalmente entre pixels, fatores espúrios à obtenção das imagens. Em particular, aqueles devido à contaminação atmosférica e variações na geometria de aquisição (FERREIRA, 2003).

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

## **2.6 Classificação não supervisionada**

A classificação digital é o processo que permite relacionar pixels em imagens de satélite a uma determinada classe temática do terreno. As técnicas de classificação de imagens podem ser divididas em três categorias gerais: supervisionada, não-supervisionada e híbrida (GONÇALVES et al., 2008).

Na classificação não-supervisionada, tem-se que o algoritmo é capaz de identificar as classes dentro de um conjunto de dados supondo que sejam fornecidos o número de classes e iterações. Esse tipo de classificação é freqüentemente efetivado através de métodos de agrupamentos (*clustering*) (COSTA; CANDEIAS, 2009).

O K-médias é um dos algoritmos mais utilizados nesse tipo de classificação. De acordo com Rabelo (2007), este algoritmo apresenta atributos confiáveis. Porém, para fazer esse tipo de análise é necessário definir o número de clusters a serem criados. Segundo Nascimento (2010), esta quantidade seria um número capaz de dividir os dados em grupos com diferenças mínimas entre os dados em um determinado grupo e grandes diferenças entre estes e os dados classificados em grupos diferentes. Foi utilizado o valor *silhouette* para testar o melhor número de grupos, de 2 a 7, no algoritmo K-médias. O valor *silhouette* é calculado através da equação (MOLLERI et al., 2009):

$$S(i) = \frac{\min((b(i, v)) - a(i))}{\max(a(i), \min(b(i, v)))}, \quad (2.1)$$

Em que  $i$  é o valor de Reflectância,  $S(i)$  é o valor *silhouette*,  $a(i)$  é a distância média da curva  $i$  a outras curvas do mesmo cluster,  $b(i)$  é a distância média da curva  $i$  a curvas de cluster diferentes, e  $(v)$  é o número de variáveis analisadas (e.g. bandas espectrais). O valor do coeficiente *silhouette* pode variar entre [-1, 1]. Valores negativos correspondem a casos em que as reflectâncias foram classificadas em grupos errados, e valores positivos e próximos de 1 indicam casos onde as reflectâncias foram agrupadas de maneira correta e distantes dos *clusters* vizinhos (MOLLERI et al., 2009).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo

Para a realização das análises, foi selecionada a região do reservatório de Itumbiara. O Reservatório de Itumbiara (18°25'S, 49°06'W) encontra-se na região do Cerrado e está localizado na divisa entre os estados de Minas Gerais, no Triângulo Mineiro, e Goiás.

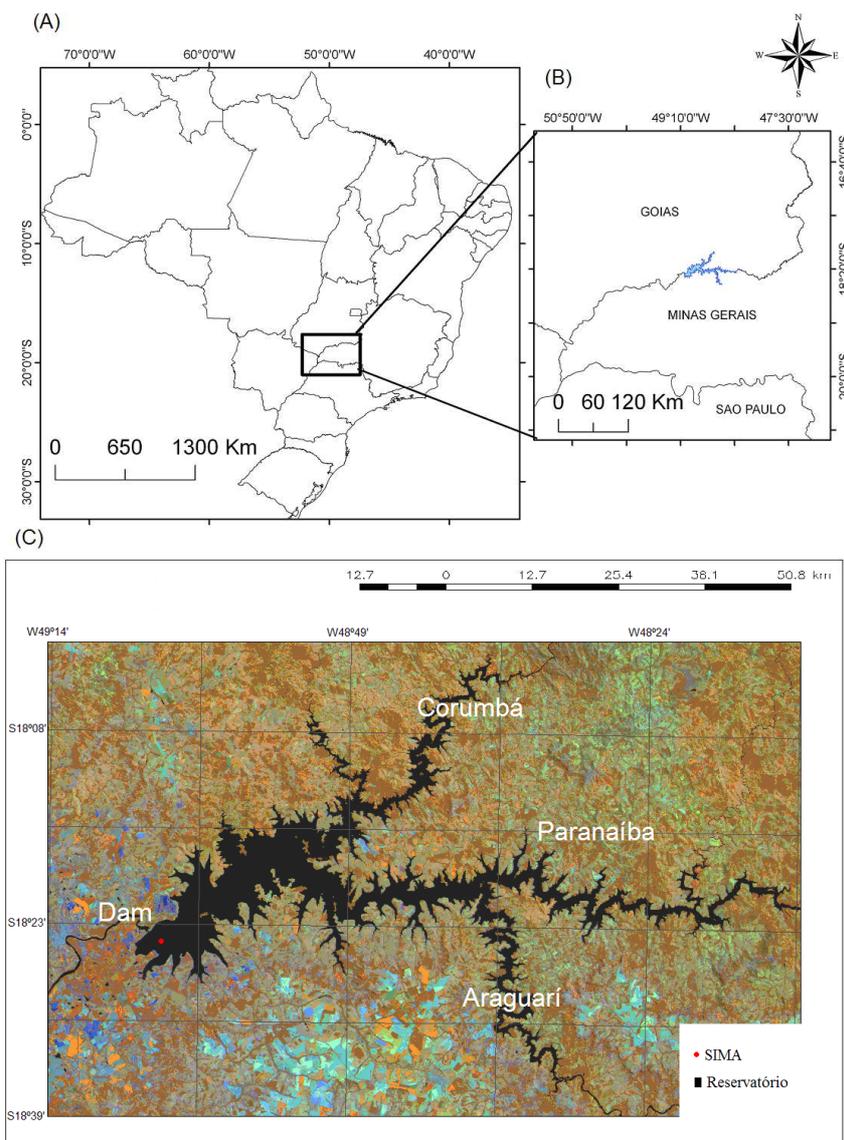


Figura 3.1 - Localização do Reservatório de Itumbiara em Goiás, Brasil (a), Contexto estadual (b) Em escala regional (c) Imagem ETM Landsat 7 de 02-04-2002, composição falsa cor 4(R), 5(G) e 6(B), mostrando a área inundada do reservatório.

O reservatório de Itumbiara é formado pelo represamento dos rios Paranaíba, Araguari e Corumbá. Possui forma dendrítica, com 778 Km<sup>2</sup> de área inundada (Figura 3.1). Localizada no rio Paranaíba, entre os Municípios de Itumbiara (GO) e Araporã (MG), a Usina Hidroelétrica de Itumbiara é a maior usina do Sistema FURNAS. A Tabela 3.1 descreve as principais características morfométricas do reservatório.

**Tabela 3.1: Principais Características do reservatório de Itumbiara**

Latitude	18°25' S
Longitude	49°06' W
Área inundada	778 km <sup>2</sup>
Perímetro	2373 km
Profundidade máxima	78,5 m
Altura máxima da barragem	106 m
Nível máximo de armazenamento	520 m
Volume total	17 bilhões m <sup>3</sup>
Volume útil	12.454 km <sup>3</sup>

Fonte: [http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina\\_hidr\\_itumbiara.asp](http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_itumbiara.asp)

A região do reservatório está contida na Bacia Hidrográfica do rio Paranaíba. O relevo dessa bacia é marcado por altiplanos cuja altitude varia entre 1.000 e 1.100 m e pelo divisor de bacias localizado entre a Chapada da Ponte Firme e a Serra da Canastra, ambas no noroeste de Minas Gerais. Nesta área montanhosa da Bacia estão as principais nascentes dos rios de Planalto, tais como o rio Corumbá, o rio São Marcos e o Araguari.

A construção do reservatório iniciou-se no ano de 1974, foi finalizada em 1979 e as operações se iniciaram em 1980. A Figura 3.2 mostra a área do reservatório antes (Figura 3.2a) e depois (Figura 3.2b) da inundação da área.

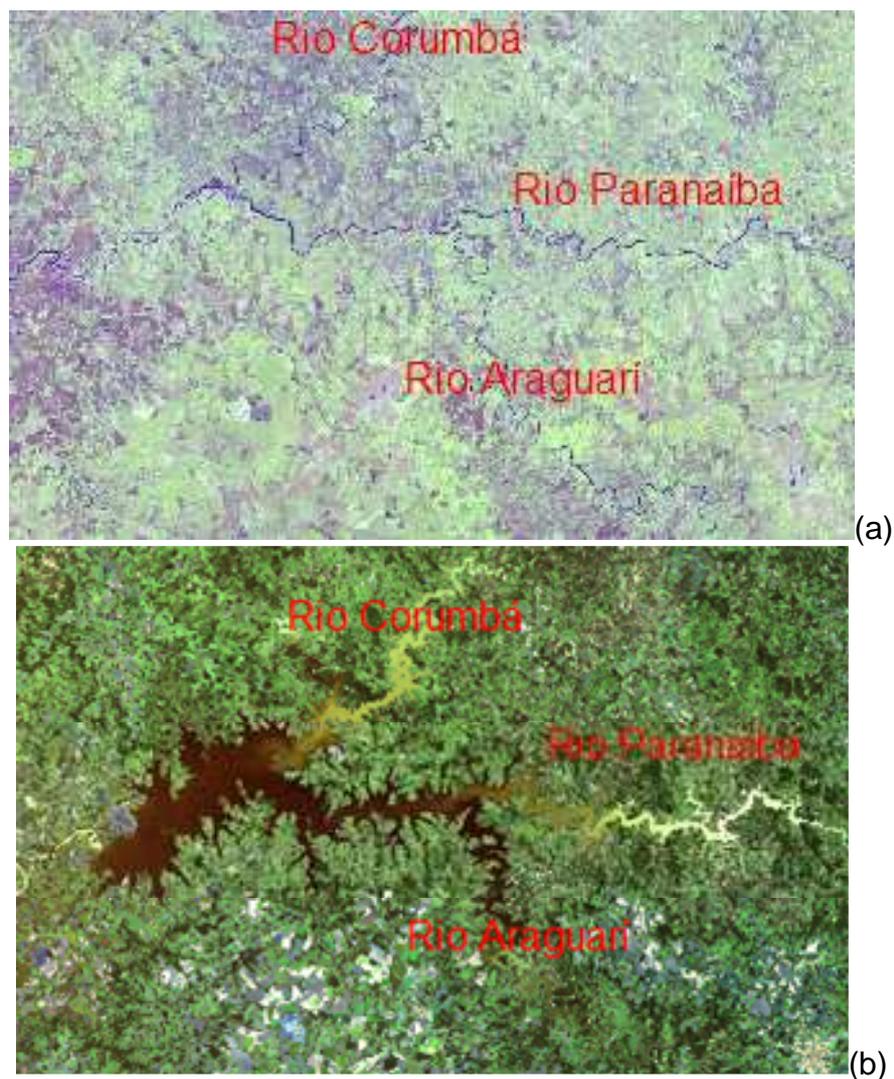


Figura 3.2 - (a) Imagem MSS-Landsat-3 de 11-08-1978 mostrando a área de estudo ( $18^{\circ}25' S$ ,  $49^{\circ}06' W$ ) antes da inundação; e (b) Imagem ETM-Landsat-7 de 02-04-2002, mostrando o reservatório inundado, ambas em composição cor verdadeira.

### 3.1.1 Caracterização climatológica e hidrológica da área de estudo

De acordo com SEPLAN - GO (2003), as condições climáticas desta bacia são determinadas por meio de fatores dinâmicos que asseguram a homogeneidade do clima característico de toda a região Centro-Oeste. O regime de circulação

das massas de ar que atuam em toda a região da margem direita do rio Paranaíba é decorrente da ação do sistema de circulação perturbada de sul (frente polar) e pelo sistema de circulação perturbada de oeste (linhas de instabilidade tropicais). O regime de chuvas na região deve-se quase que exclusivamente ao sistema de circulação atmosférica com pouca influência do relevo sobre as tendências gerais determinadas pelos fatores dinâmicos.

Segundo Alcântara et al. (2009), o clima na região é caracterizado pela precipitação com domínio de variação de 2,0 mm na estação seca (Maio - Setembro) até 315 mm na estação chuvosa (Outubro – Abril). Na estação chuvosa, a intensidade dos ventos varia de 1,6 a 2,0  $\text{ms}^{-1}$  atingindo até 3  $\text{ms}^{-1}$  na estação seca. A seguir, são apresentadas as médias mensais de precipitação na região, esses dados foram obtidos através do sítio <<http://www.tempoagora.com.br>>.

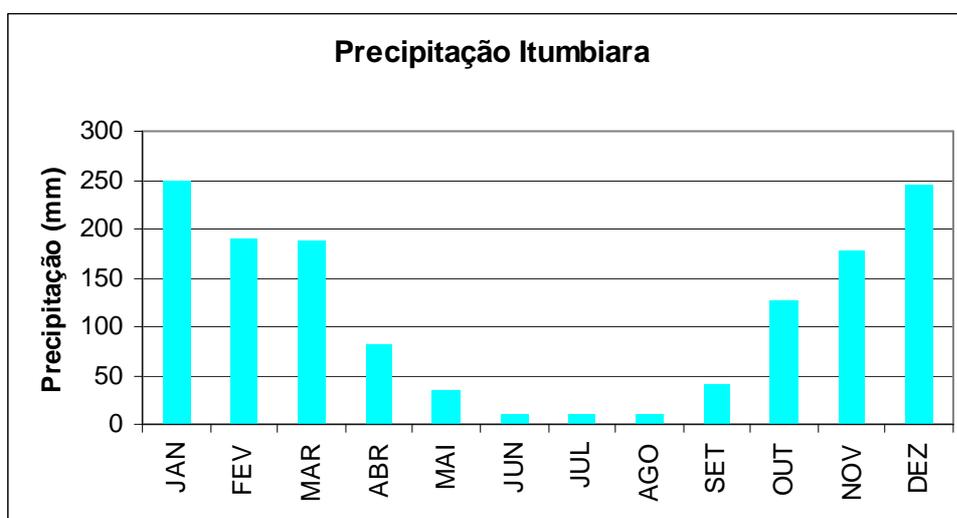


Figura 3.3 - Variabilidade sazonal da chuva em Itumbiara, representada pelas chuvas médias mensais no período de 1961 a 1990.

Fonte: <http://www.tempoagora.com.br>

O relatório da SEPLAN – GO (2003) também lista as características de precipitação predominantes da região:

- Período chuvoso estende-se de novembro a março, com o trimestre mais úmido correspondendo aos meses de janeiro, fevereiro e março;
- Período seco é representado pelos meses de junho, julho e agosto.

Além disso, o regime hidrológico dos rios da região desta bacia é regulado pela estação das chuvas, bem demarcadas nesta região do Brasil. Assim, esse período chuvoso ocorre entre outubro e março e nos demais seis meses do ano as chuvas tornam-se rarefeitas. A vazão específica da bacia é de 7,65 L/s/km<sup>2</sup>. Na sua foz, o rio Paranaíba tem uma vazão média de 1.700 m<sup>3</sup>/s. A vazão de retirada (demanda) da bacia é de 57,50 m<sup>3</sup>/s.

A região da bacia apresenta características de clima tropical, com 1 a 5 meses secos. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região se enquadra no tipo AW, característico dos climas úmidos tropicais, com duas estações bem definidas - seca no inverno e úmida no verão (KOTTEK et al., 2006).

Considerando as condições médias, o regime térmico apresenta pouca variação. As diferenças acentuadas ocorrem geralmente com as mínimas (inverno) e máximas (primavera) diárias, como pode ser visto na Figura 3.4 (SEPLAN - GO, 2003).

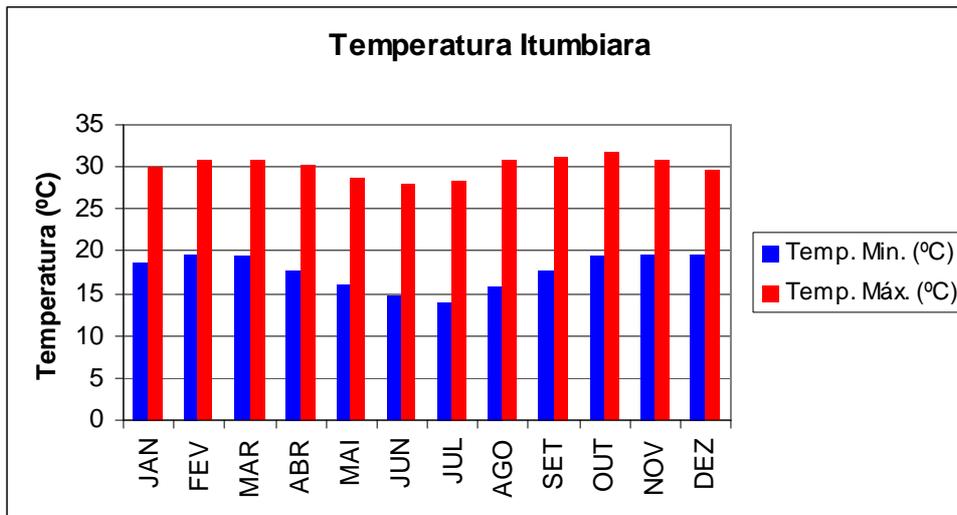


Figura 3.4 - Variabilidade sazonal da temperatura em Itumbiara, representada pelas temperaturas mínimas e máximas mensais no período de 1961 a 1990

Fonte: <http://www.tempoagora.com.br>

O reservatório possui uma variação de cota em relação à época do ano, sendo dependente do regime hidrológico e das rotinas de operação para geração de energia elétrica da Usina Hidroelétrica. A variação dos níveis da água no reservatório pode ser visualizada por meio da Figura 3.5.

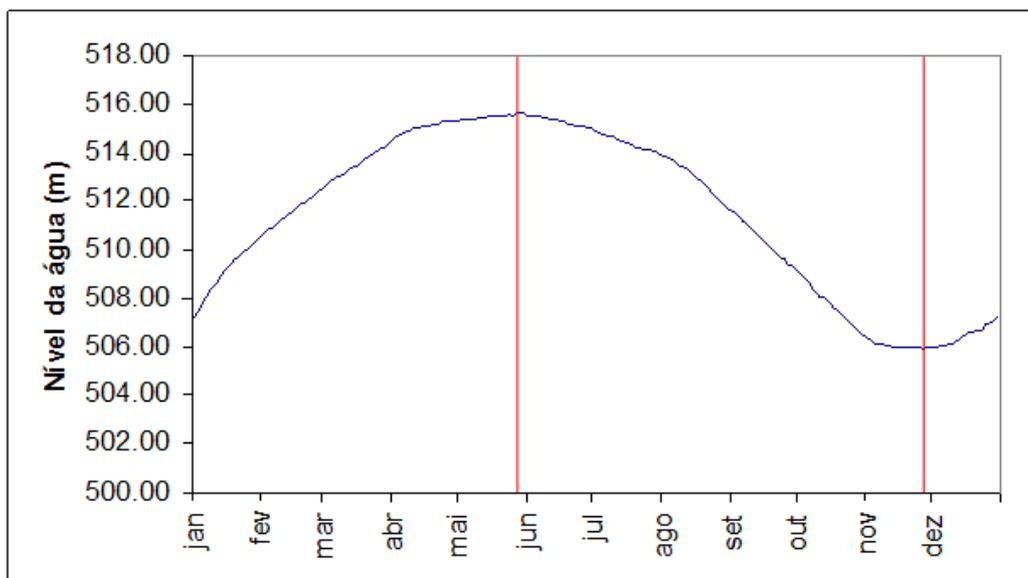


Figura 3.5 - Variação média diária (2003-2008) do nível da água no Reservatório.

Fonte: Adaptado de Alcântara (2010).

### 3.2 Dados Orbitais

O sensor MODIS faz parte das Plataformas Aqua e Terra do Programa *Earth Observing System* (EOS) desenvolvido pela Agência Espacial Americana (NASA). Possui 36 bandas espectrais (459-1390nm) e gera imagens de 250 m, 500 m e 1 km de resolução espacial. Todas as imagens utilizadas no presente trabalho foram adquiridas pelo sensor MODIS-Aqua, por meio do *Warehouse Inventory Search Tool* - WIST (EOSDIS, 2009). Foram compiladas 475 imagens diárias de reflectância da superfície e 72 composições médias de 8 dias compreendendo o período entre 20/09/2009 e 30/03/2011. O MODIS *Reprojection Tool* - MRT (DWYER; SCHMIDT, 2006) foi utilizado para converter os dados para coordenadas planares (UTM, WGS-84). Foram utilizadas 7 bandas espectrais no intervalo 459-2155 nm. As bandas 3 (459 nm – 479 nm), 4 (545 nm – 565 nm), 5 (1230 nm – 1250 nm), 6 (1628 nm – 1652 nm) e 7 (2105 nm – 2155 nm) com 500 m de resolução espacial original, foram reamostradas para 250 m conforme as bandas 1 (620-670 nm) e 2 (841-876 nm). Os diferentes processamentos digitais, a serem mencionados a seguir, foram realizados no ambiente de análise de imagens ENVI<sup>®</sup> (ITT, 2009), no Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) desenvolvido pelo INPE e no ArcGIS (ESRI, 2004). Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais aplicações das bandas 1, 2, 3, e 4 em sistemas aquáticos continentais. As bandas da região do infravermelho (5, 6 e 7) também foram utilizadas no presente estudo, elas foram importantes para a detecção de nebulosidade e contaminação atmosférica.

Tabela 3.2 - Características principais das bandas 1, 2, 3 e 4, MODIS-Aqua (produto MYD09) utilizadas no presente trabalho.

Banda	Largura de Banda ( $\mu\text{m}$ )	Aplicação em sistemas aquáticos continentais do produto MYD09
1	0,620-0,670	Sensível a variações na concentração de partículas inorgânicas em suspensão
2	0,841-0,876	Permite delimitar a superfície de água livre dos lagos e auxíla o mapeamento do limite entre água e vegetação
3	0,459-0,479	Sensível a presença de matéria orgânica dissolvida na água
4	0,545-0,565	Sensível ao espalhamento pelas células fitoplanctônicas

Fonte: Adaptado de Novo et al.(2007)

A série de satélites ambientais geoestacionários *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) tem como principal missão monitorar condições meteorológicas incluindo furacões, tempestades e sistemas frontais. Estes satélites são posicionados sobre o equador a uma altura de 35.800 km, aproximadamente. O GOES-12 está em 60° de longitude oeste e é dedicado ao monitoramento da América do Sul e oceanos adjacentes fornecendo imagens a cada 30 minutos. O principal sensor a bordo do satélite GOES-12 é um dispositivo de 5 canais espectrais sendo um no visível (550 nm - 750  $\mu\text{m}$ ), três canais Infravermelhos (3800 nm - 4000 nm, 10200 nm - 11200 nm, 11500 nm - 12500 nm) e o canal de vapor d'água (6500 nm - 7000 nm). No canal visível, a resolução nominal é de 1 km. Nos canais infravermelhos, a resolução é de 4 km. No canal vapor d'água, a resolução é de 8 km.

### 3.3 Dados da boia SIMA

Uma importante fonte de dados *in situ* foi o Sistema Integrado de Monitoração Ambiental (SIMA), mostrado na Figura 3.6. Esse sistema foi desenvolvido a partir da ação conjunta entre a Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para fornecer uma ferramenta útil ao gerenciamento e controle ambiental de recursos hídricos. Os dados coletados em intervalo de tempo pré-programado são transmitidos via satélite e estão disponibilizados através do portal do Projeto Balanço de Carbono,



Figura 3.6 - Foto da boia SIMA instalada no reservatório de Itumbiara.  
Fonte: Alcântara et al. (2010)

Foram utilizados dados referentes às seguintes variáveis ambientais: temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ) em 4 níveis de profundidades (5, 12, 20 e 39 m), pH, turbidez (*Nephelometric Turbidity Unit* - NTU), concentração de oxigênio dissolvido (mg/l), condutividade (MS/cm), concentrações de nitrato (mg/l), amônia (mg/l) e clorofila ( $\mu\text{g/l}$ ). Apesar do conjunto de dados apresentar lacunas, foram utilizadas nas diversas análises, as informações nos períodos disponíveis e concomitantes com as imagens MODIS. Todos os dados da boia foram normalizados em unidades relativas entre 0 e 1, a fim de evitar erros de escala por meio da seguinte equação:

$$x = \frac{x_i - \min}{\max - \min} \quad (3.1)$$

Onde *min* equivale ao valor mínimo observado para cada variável *x<sub>i</sub>*, *max* equivale ao valor máximo observado de cada variável e *x* é o padrão entre [0,1] (KAMPEL, 2003).

### 3.4 Dados da PCD Itumbiara

Os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, direção e intensidade do vento referentes ao período de estudo, foram obtidos por meio de uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD), instalada na Estação Hidro-Meteorológica de Itumbiara (18° 24' S, 49° 11' W). Estas informações são disponibilizadas gratuitamente na Internet, através do sítio <<http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>>. As PCDs são dispositivos eletrônicos com capacidade de transmitir via satélite, parâmetros ambientais captados pelo uso de sensores. Estas plataformas surgiram devido à necessidade de tornar o sistema de coleta de dados mais eficaz, pois anteriormente havia a necessidade de visitas periódicas aos locais ou ainda a manutenção de pessoas residentes que fizessem as leituras e a transmissão para uma central de tratamento (MOTTA; SANTOS, 2001).

### 3.5 Dados de Reanálise

Os dados de pressão atmosférica ao nível do mar, referentes ao período de estudo, foram obtidos pelo portal na internet *Earth System Research Laboratory, Physical Science Division, National Oceanic and Atmospheric Administration* (ESRL/PSD/NOAA) (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html>).

### 3.6 Dados de Campanhas de Campo

Foram utilizados dados secundários de campo referentes às variáveis limnológicas turbidez e concentração superficial de clorofila (NASCIMENTO,

2010; NASCIMENTO et al., 2011). Duas campanhas de campo foram realizadas por Nascimento (2010) no reservatório de Itumbiara, sendo uma no período de cheia (12-13/05/2009) e outra no período de vazante (9-11/09/2009).

### **3.7 Identificação de Sistemas Frontais**

Como a frente fria é uma zona de transição entre duas massas de ar, uma quente e uma fria, alguns parâmetros físicos respondem de maneira padronizada durante esses eventos. Foi utilizado como critério objetivo para a identificação desses sistemas: diminuição da temperatura atmosférica ( $^{\circ}\text{C}$ ); diminuição da pressão atmosférica (hPa) e aumento na velocidade zonal e meridional do vento (m/s). Foi desenvolvido um programa de computador (Anexo A) utilizando o software MATLAB<sup>®</sup>, para identificar na série temporal de dados quais os períodos nos quais essas variações ocorreram. Entretanto, alguns dos eventos não foram facilmente identificados através dessa abordagem computacional. Dessa forma, informações sinóticas complementares sobre os eventos foram obtidas por meio dos boletins Climanalise, publicados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Esses boletins apresentam mensalmente a análise sinótica dos sistemas meteorológicos sazonais atuantes no Brasil, discutindo a evolução, intensificação e enfraquecimento dos mesmos. A análise também é feita caracterizando as diferentes regiões brasileiras, destacando, entre outros, os eventos atuantes na região centro-oeste. Além do uso dos boletins, para confirmação da presença do evento na região de Itumbiara, foram utilizadas imagens dos satélites GOES-10 e/ou GOES-12 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*). Na Figura 3.7 é apresentada uma seqüência para exemplificar o uso das imagens GOES na identificação dos sistemas frontais.

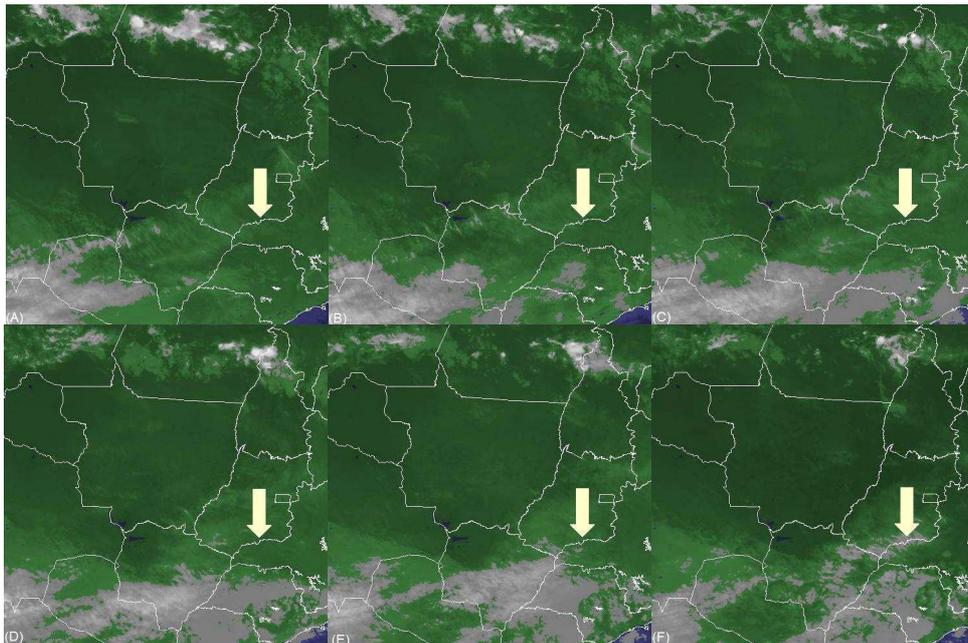


Figura 3.7 - Imagens GOES 12 do dia 10/06/2010 indicando a passagem de um sistema frontal. Os registros foram feitos em (A) 2h; (B) 4h; (C) 6h; (D) 8h; (E) 10h; (F) 12h. As setas mostram o local do reservatório de Itumbiara, GO.

### 3.8 Análise espectral de massas de água sob a influência de sistemas frontais

Depois de identificados os eventos de frentes frias, foram realizadas classificações nas imagens MODIS referentes aos dias anteriores e posteriores às passagens desses sistemas ( $\pm 2$  dias). O algoritmo de agrupamento (*clustering*) K-médias foi utilizado para classificar as sete bandas espectrais MODIS (MYD09) e assim, definir o número ótimo de classes espectrais em cada período. Foram gerados 30 pontos aleatórios na área do reservatório (Figura 3.8), de onde foram extraídos os valores de reflectância.

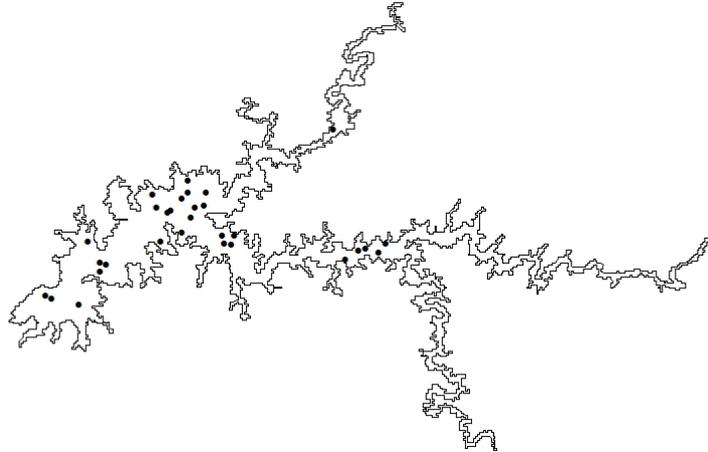


Figura 3.8 – Localização dos 30 pontos aleatórios selecionados no reservatório de Itumbiara para a extração de valores de reflectância e análise de agrupamento de massas de água sob influência de sistemas frontais.

### **3.9 Análise de parâmetros de qualidade da água sob influência de sistemas frontais**

Foram calculados os valores médios, máximos e mínimos de variáveis limnológicas medidas pela boia SIMA nos dias anteriores e posteriores ( $\pm 1$  dia) à identificação dos sistemas frontais. Considerando a consistência variável na disponibilidade de dados, foram selecionadas para esta análise, as seguintes variáveis: condutividade, concentração de oxigênio dissolvido, pH, concentração de amônia, concentração de nitrato, turbidez e clorofila.

Em uma abordagem complementar, as variáveis turbidez e clorofila medidas *in situ*, tanto pela boia SIMA como por campanhas pretéritas (Nascimento, 2010), foram correlacionadas estatisticamente com dados de reflectâncias diárias e composições médias 8 dias MODIS. Foram utilizadas reflectâncias nas bandas do vermelho (B1 = 620 a 670 nm), infravermelho próximo (B2 = 841 a 876 nm), azul-verde (B3 = 459 a 479 nm) e verde (B4 = 545 a 565 nm), assim como, de razões de bandas (B2/B1 e B3/B4).

As comparações com dados da boia SIMA foram realizadas em relação às médias MODIS de 8 dias. Desta forma, foram calculados os valores médios *in situ* considerando os períodos equivalentes às imagens. No caso das campanhas pretéritas, foram utilizadas imagens diárias para as comparações com os dados de campo. Em ambos os casos, os valores de reflectância foram extraídos como a mediana de janelas de 3x3 pixels centrados nas coordenadas dos respectivos pontos de coleta.

### **3.10 Análise de compartimentação do reservatório**

O fluxo de água e a heterogeneidade espaço-temporal das respostas das variáveis limnológicas nas diferentes zonas que compõem um reservatório dificultam a definição de compartimentos nesses ambientes. Com base em uma análise qualitativa da série temporal de imagens MODIS médias de 8 dias, dividiu-se a área do reservatório de Itumbiara em 4 regiões, definidas como: Araguari, Corumbá, *Corpo do reservatório* e Paranaíba. Em cada uma dessas regiões, foram gerados 100 pontos aleatórios que serviram como pontos amostrais sintéticos para estimar a turbidez e a clorofila por sensoriamento remoto, de acordo com os resultados do item 3.9 anterior. A seguir, foram calculados os valores médios dos 100 pontos referentes a cada região, para todas as 72 imagens médias 8 dias. Estes valores médios foram comparados estatisticamente aplicando-se os testes de Scheffe, Bonferroni e Fisher LSD.

### **3.11 Análise vertical da coluna de água**

A coluna de água dos reservatórios tropicais, em sua dimensão vertical, está sujeita à dinâmica de sua estabilidade e mistura que por sua vez, influenciam a qualidade de água (BRANCO et al., 2009). A estabilidade relativa da coluna água (*Relative Water Column Stability*) - RWCS, foi calculada comparando-se as diferenças de densidade entre as camadas de superfície e fundo com a

diferença de densidade entre 4° e 5°C, como sugerido por Branco et al. (2009)(*op.cit.*):

$$RWCS = \frac{D_b - D_s}{D_4 - D_5} \quad (3.2)$$

Onde  $D_s$  e  $D_b$  são as densidades para as temperaturas de superfície e fundo, respectivamente e  $D_4$  e  $D_5$  são as densidades em 4° e 5°C. Esse método indica o grau de estabilidade da coluna d'água como um todo.

Para verificar a resistência térmica de mistura entre as massas de água, a resistência relativa térmica (RTR) foi calculada em 3 intervalos de profundidade – 5 a 12 m, 12 a 20 m e 20 a 39 m, entre janeiro e julho de 2010. Este foi o período em que se obteve um conjunto consistente de dados *in situ* medidos pela boia SIMA. A RTR é calculada pela razão entre a diferença de densidade entre os limites de cada intervalo de profundidade e ( $D_4 - D_5$ ). Esta métrica destaca a resistência termal relativa à mistura com base em diferenças de densidade entre as camadas de água em profundidades adjacentes.

### **3.12 Caracterização bio-óptica por sensoriamento remoto**

O sensoriamento remoto permite a análise da reflectância emergente da superfície de corpos de água de modo a se obter informações sobre a presença e concentração de constituintes opticamente ativos (COA). Os três principais COA são o fitoplâncton, material em suspensão e matéria orgânica dissolvida (KAMPEL; NOVO, 2005).

No presente trabalho, foram gerados mapas de abundância relativa dos COA presentes nas águas do reservatório de Itumbiara, pela aplicação da técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) à série temporal de imagens médias MODIS 8 dias. Foi utilizada a ferramenta *Spectral Hourglass Wizard*, disponível no *software* ENVI<sup>®</sup> 4.7. Esse módulo auxilia no processo de extração

de *endmembers* e facilita a aplicação do MLME em dados hiperespectrais e multiespectrais (ITT, 2009). Primeiramente, é feita a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF), para descorrelacionar as informações entre quatro bandas espectrais MODIS (B1, B2, B3 e B4). A segunda etapa é a geração do visualizador n-dimensional, a partir do qual são obtidos os espectros dos membros de referência (MR) ou *endmembers*. Desta forma, foram selecionadas as curvas espectrais mais parecidas com os espectros típicos de cada COA, encontrados na literatura (KIRK, 1994; BUKATA et al., 1995; IOCCG, 2000; MOBLEY, 2004). Depois de criada uma biblioteca espectral para cada imagem, a aplicação da técnica MLME tem como resultado uma imagem da abundância de COA.

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

$$R_{pi} = \sum f_j r_{ij} + \varepsilon_i \quad (3.2)$$

onde,  $R_{pi}$  é a reflectância do pixel  $p$  na banda  $i$ ;  $f_j$  é a abundância fracional do MR $j$ ;  $r_{ij}$  é a reflectância na banda  $i$  do MR $j$ ; e  $\varepsilon_i$  é o erro no comprimento de onda  $i$  (RUDORFF, 2005).

A solução para este modelo linear é baseada em duas premissas: (a) a soma de  $f$  deve ser igual a 1; (b) os valores de  $f$  serão sempre entre 0 e 1, se os MRs forem espectralmente puros entre os mesmos. O processo de inversão do modelo determina o valor de  $f_j$  para cada MR $j$ . A abundância fracional

calculada para cada pixel da imagem é então rearranjada espacialmente e reproduzida na forma de imagens.

A partir dos valores de abundância de cada COA, foi construído um diagrama triangular indicando a contribuição relativa de cada componente no *corpo do reservatório*. Essa classificação é baseada nas contribuições relativas dos três tipos de constituintes e não depende da magnitude das contribuições individuais. A contribuição da água pura não entra na classificação, já que seu coeficiente de absorção é uma propriedade óptica constante. Cada amostra pode assim ser caracterizada bio-ópticamente por um ponto único no diagrama ternário, no qual cada eixo representa a contribuição proporcional de cada COA. Se a contribuição de um único componente é dominante, o ponto representando a respectiva amostra se moverá para o vértice correspondente do triângulo. Porém, se a contribuição dos três constituintes for equivalente, o ponto se moverá para o centro do triângulo equilátero (PRIEUR; SATHYENDRANATH, 1981). Aqui, foram utilizadas as contribuições referentes ao conjunto de 100 pontos aleatórios que serviram como pontos amostrais sintéticos descritos nos itens 3.9 e 3.10 anteriores. Assim, cada ponto no diagrama triangular representa a média dos 100 pontos do *corpo do reservatório*, em cada data (imagem média 8 dias).

Além do diagrama triangular, de maneira complementar para melhorar a visualização das contribuições relativas de cada COA foi utilizada a técnica de geoprocessamento de classificação por fatiamento. Os resultados do MLME foram transformados em mapas de classificação de abundância regular, as classes foram separadas em intervalos de abundância para cada fração gerada pelo MLME nos intervalos de: 0 a 19% (Azul); 20 a 39% (Amarelo); 40 a 59% (Laranja); 60 a 79% (Rosa) e 80 a 100% (Vermelho). Nesse caso a classe que contém os valores de maior abundância foi usada.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estatística Básica das Frentes Frias

Com o auxílio das imagens de satélite e dos boletins climatológicos mensais, pode-se observar que diversos sistemas meteorológicos de escala sinótica atuaram na região Centro-Oeste do Brasil, no período de estudo provocando chuvas de grande intensidade. Dentre esses sistemas, os principais foram: frentes frias, jatos subtropicais, vórtices ciclônicos, ZCAS e ENSO (*El Nino Southern Oscillation*). Em um terço dos eventos de frente fria observados houve associação do sistema frontal com outros sistemas transientes. Na tabela 4.1 estão expostas as quantidades de cada evento que foram encontrados na série temporal. Muitas vezes a associação entre esses fenômenos foi o que possibilitou que a frente fria conseguisse ultrapassar os 20°S de latitude em direção para norte.

Tabela 4.1 - Quantidade de eventos associados aos sistemas frontais analisados no período de 20/09/2009 a 30/03/2011.

Evento Associado ao Sistema Frontal	Jato Subtropical	Vórtice Ciclônico	ZCAS	ENSO
Número de Ocorrências	5	3	2	1

Além dos boletins climatológicos Climanálise foram utilizadas imagens GOES para confirmação de ocorrência de frentes frias na área de estudo. Algumas das frentes descritas nos boletins não atingiram a região do reservatório de Itumbiara, mas a maioria foi coincidente. Andrade (2005) utilizou dados de precipitação para a contabilização das frentes, pois segundo este autor, no verão, principalmente em latitudes mais ao norte, como é o caso da área de estudo, não há contraste significativo da temperatura, mas os sistemas são acompanhados por ocorrência de precipitação.

Na Figura 4.1, pode-se observar os valores de anomalia de precipitação em azul e em vermelho, a quantidade de dias nos quais houve valores de

precipitação menores do que 10 mm. Este valor representa a menor média da normal climatológica da precipitação (referente ao mês de junho). Os dados de anomalia foram importantes para a verificação de distúrbios positivos na série de precipitação. Essas anomalias foram calculadas com os dados de precipitação da seguinte maneira:

$$A = (P_o - P_n) / P_n \quad (4.1)$$

Onde:

A = Anomalia;

P<sub>o</sub> = Precipitação observada;

P<sub>n</sub> = Precipitação normal climatológica.

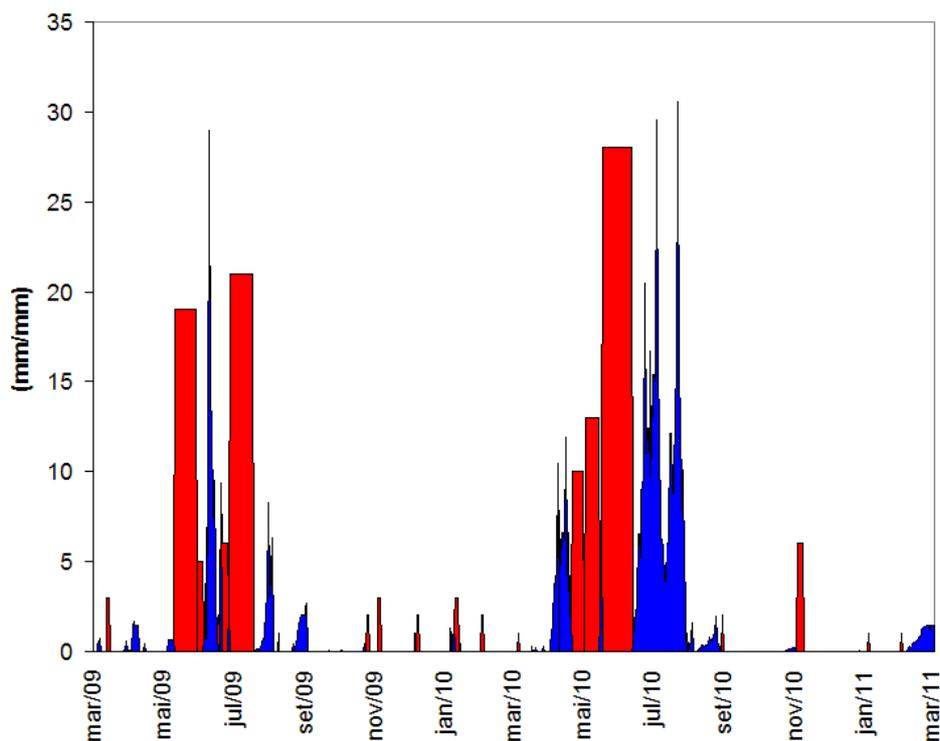


Figura 4.1 - Em azul as anomalias positivas de total precipitado. Em vermelho (dias) o espaço de tempo no qual não houve precipitação.

Pode-se observar que assim como as precipitações mais intensas foram precedidas por mais dias sem chuva, as maiores anomalias foram observadas no inverno, período no qual foi constatada o maior número de sistemas frontais incidentes. De acordo com INPE (2009) no ano de 2009, algumas regiões brasileiras apresentaram totais de precipitação que excederam a média histórica. Nas séries temporais, notou-se que em anos anteriores ocorreram desvios positivos de precipitação maiores que em 2009. Contudo, nos cinco anos anteriores, as chuvas ocorreram abaixo da média especialmente na Amazônia e no Sudeste. Para o ano de 2010, os meses de fevereiro, junho e agosto foram os únicos meses onde foram registradas poucas ocorrências de chuvas fortes. Já para os meses abrangidos no estudo do ano de 2011, as chuvas ficaram acima da média climatológica. Kousky (1979) notou que há uma tendência de anos com maiores totais de precipitações corresponderem a anos com maior número de passagem de frentes.

Na figura 4.2 além dos valores de anomalia positiva foram marcados os dias iniciais de todos os eventos frontais que ocorreram no período de estudo.

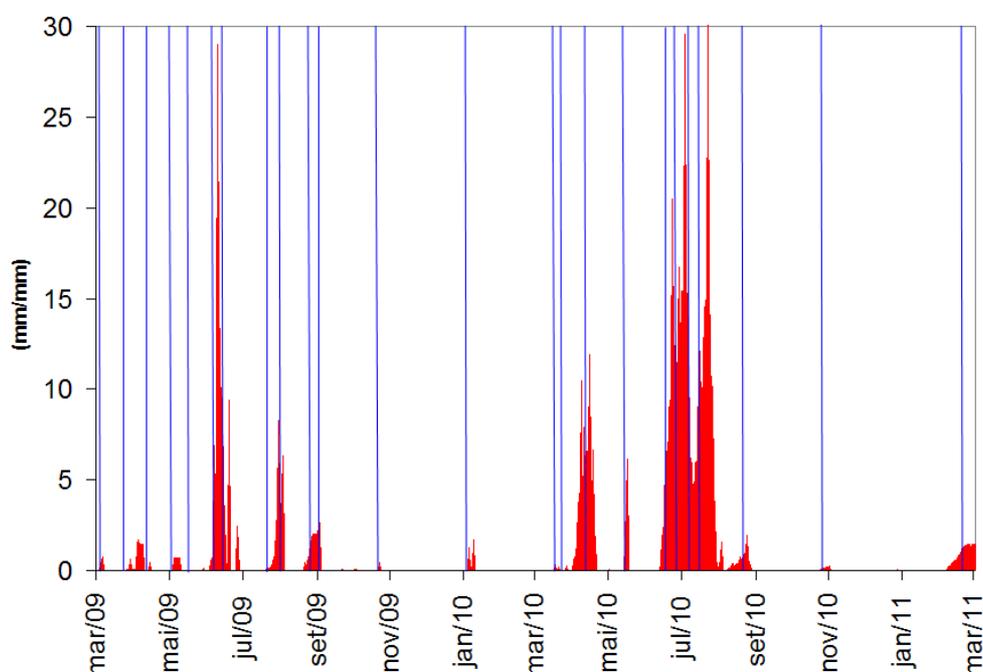


Figura 4.2 - Em vermelho as anomalias positivas de total precipitado e os dias iniciais dos eventos de frente fria (azul).

Foi observada uma boa correlação ( $R^2 = 0.75$ ) entre a quantidade de dias com anomalia de precipitação e a quantidade de dias com frentes frias (observados nas imagens GOES), como pode ser visto na Figura 4.3.

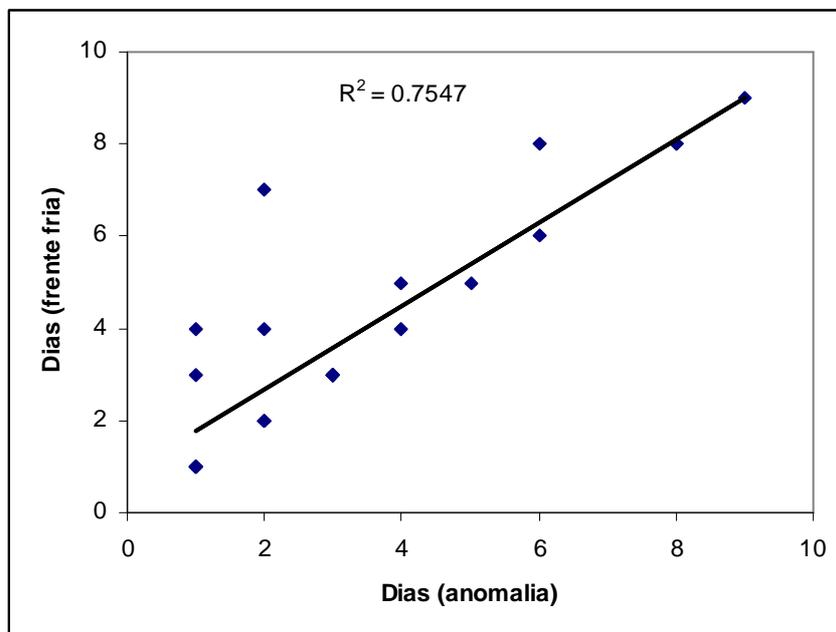


Figura 4.3: Relação entre os dados de anomalia e os dados observados de frentes frias.

As análises visuais com imagens GOES consistiram em observações da nebulosidade onde foram computadas as frentes frias que conseguiram ultrapassar a faixa latitudinal da área de estudo. Observou-se por meio dessa análise que os sistemas frontais observados têm deslocamento típico de sudoeste para nordeste. Os resultados da climatologia aqui desenvolvida são apresentados em forma de histogramas da distribuição anual. Na Figura 4.4 pode-se observar a média da quantidade de sistemas frontais observada em cada mês.

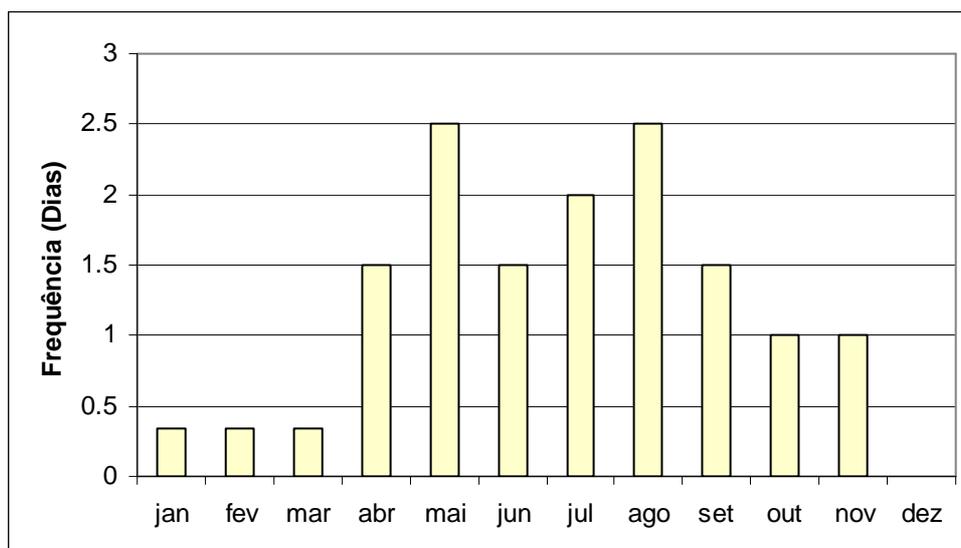


Figura 4.4 - Média mensal do número de frentes frias observadas em Itumbiara, durante o período de setembro de 2009 a março de 2011.

Verifica-se que em maio e em agosto foram registradas em média 2 – 3 ocorrências de Sistemas Frontais e em dezembro, não houve registro. No período de seca, que compreende os meses de março a julho, foi observado que ocorrem em média 7,8 eventos frontais, enquanto que na estação chuvosa, que vai de outubro até dezembro, ocorreram em média dois eventos. Foram identificados mais casos de frentes que se deslocam até latitudes mais baixas no inverno. Segundo Andrade (2005), é nessa época do ano que há um maior contraste térmico separando as massas de ar e estas chegam a atingir a Região central do país. Algumas vezes, os sistemas frontais podem chegar até o sul da Região Norte, caracterizando o fenômeno conhecido como “friagem” (FORTUNE; KOUSKY,1983).

Mattos (1987) observa que nas regiões sul e sudeste, os sistemas frontais ocorrem com maior frequência na primavera, mesmo resultado encontrado por Rodrigues (2004) que fez uma climatologia para 10 anos.

As análises sobre a passagem de sistemas frontais no Brasil iniciadas por Oliveira e Nobre (1986) foram continuadas por Lemos e Calbete (1996) e depois por Fernandes e Campos (2006). Nesses trabalhos foram delimitadas

bandas latitudinais para estudar o comportamento dos sistemas frontais no território brasileiro. Dentre os resultados, Fernandes e Campos (2006) encontraram que entre os anos de 1996 a 2004, as frequências dos sistemas frontais aumentaram em comparação ao período de 1975 a 1984. A média de passagem de sistemas frontais para o período desse estudo ficou entre 5,5 a 7. Durante os meses de abril a dezembro entre as latitudes de 35°S - 25°S, o número de sistemas observados foi maior que quatro. A média para o mês de abril foi 5,4 e para o mês de dezembro foi de 6,9. Entre as latitudes de 25°S - 20°S, as médias mensais, de abril a dezembro, de passagens de sistemas frontais variaram entre 3,4 e 5,5. Entre os meses de abril a junho e de outubro a novembro foram observados entre as latitudes de 20°S - 10°N uma média de 2 a 2,5 sistemas frontais. De acordo com esses autores, as frentes que ultrapassam 20°S rumo ao nordeste são menos frequentes, e na maior parte das vezes estão associadas com a convecção tropical na Amazônia, com o máximo ocorrendo em novembro.

Andrade (2005) também registrou que em latitudes mais baixas há uma diminuição do número de sistemas registrados. Ele afirma que embora o número de sistemas que chegam a latitudes mais ao norte seja menor, nota-se que aqueles que chegam até o Sudeste ou mesmo ao sul da BA acabam sendo responsáveis por grande parte da precipitação nessas áreas.

Assim como em Kousky (1979), Oliveira e Nobre (1986) e Andrade (2005), no presente trabalho também foi observado que o verão é a estação que tem a menor incidência de frentes frias sobre a região estudada. Segundo Andrade (2005), no verão ocorrem períodos de influência da ZCAS e quando as frentes atingem o Sudeste interagem com a convecção tropical. Para o outono, inverno e primavera o número de sistemas que chegam até o sul da Bahia tanto pelo litoral quanto aqueles que passam pelo Sul e Sudeste aumenta em relação ao verão. Ou seja, são nessas estações do ano que os sistemas atingem latitudes mais ao norte e a oeste. A explicação para isso, é que no verão há a atuação da ZCAS, e os sistemas que chegam até o Sudeste atuam na manutenção da

ZCAS. O fato dos sistemas também não conseguirem atingir latitudes mais ao norte, passando a região Sudeste, pode ser devido à presença dessa zona de convergência, que pode atuar como uma barreira para o avanço dos sistemas frontais, fazendo com que estes cheguem apenas até essas regiões (ANDRADE, 2005).

O tempo decorrido entre os eventos de frentes pode ser visto no Histograma apresentado na Figura 4.5:

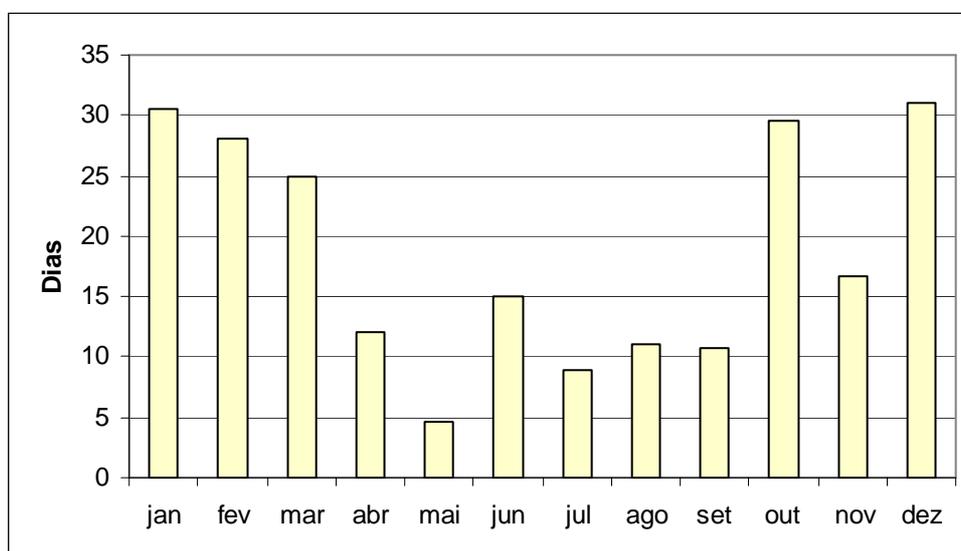


Figura 4.5 - Tempo médio em dias decorrido entre os eventos de frente fria, durante o período de setembro de 2009 a março de 2011.

No período inverno, as frentes frias demoram em média treze dias para ocorrer e no verão, esse valor aumenta para 25,7 dias. No mês de maio, esses sistemas demoraram menos tempo pra ocorrer. Outra informação relevante em relação aos Sistemas Frontais que ocorreram no período estudado é a quantidade de dias de cada evento (Figura 4.6). Observa-se que as maiores médias ocorreram nos meses de abril e novembro, ambos com frentes variando em média cinco dias. Em janeiro e março as médias foram de um dia.

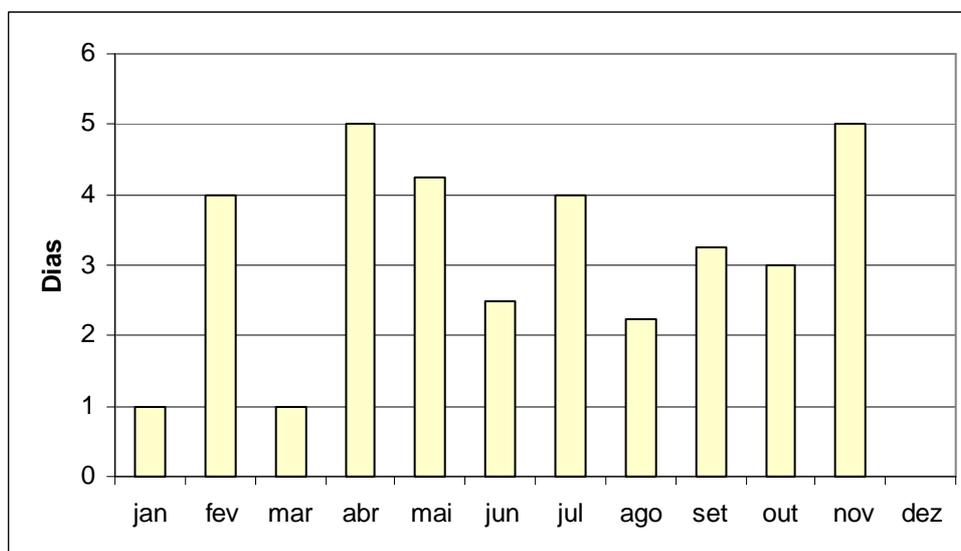


Figura 4.6 - Média mensal da duração (dias) dos eventos frontais, durante o período de setembro de 2009 a março de 2011.

No período de inverno, as frentes duraram em média 2,6 dias enquanto no verão, o período foi de 3,9 dias. Nenhum evento foi contabilizado em dezembro nos anos analisados no presente trabalho. Os dados referentes aos valores médios para o período de inverno e para o período de verão são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Informações sobre os sistemas frontais observados nos períodos de inverno e verão para a série estudada durante o período de setembro de 2009 a março de 2011.

	inverno	verão
Média do número de dias dos sistemas frontais	3.35	2.67
Média do nº de dias entre a passagem dos sistemas frontais	13.08	25.72
Média da quantidade de sistemas frontais registrados	8.17	2.00

## 4.2 Classificação e Análise de Cluster

Como os eventos de frentes frias são acompanhados por forte ocorrência de nuvens, apenas em duas situações foi possível utilizar essa técnica utilizando dados na faixa espectral do visível. O primeiro caso é o da frente fria que ocorreu entre os dias 10 e 12 de junho de 2010. Neste caso, as melhores divisões de classes obtidas pelo método de análise de Cluster e as classificações realizadas com o classificador K-médias para a seqüência de imagens podem ser vistos na Figura 4.7. Na imagem do dia 10, as águas do reservatório foram divididas em 2 grupos, onde nota-se que existe uma classe principal que é formada pelo *corpo do reservatório* e outra classe formada pelos braços e pelas bordas do mesmo. Os maiores efeitos da passagem dessa frente sobre o reservatório foram registrados no dia 11, quando ocorreram maiores valores de precipitação. Nos dias 12 e 13 observa-se que o comportamento espectral superficial do reservatório tornou-se mais heterogêneo já que com a análise de cluster as águas foram divididas, respectivamente, em 6 e 7 grupos. Com a classificação da imagem do dia 14, nota-se que as águas começam a voltar ao padrão original identificado na classificação da imagem do dia 10. Contudo, nessa data, houve melhor divisão da imagem em 4 grupos, o reservatório fica com águas mais homogêneas, já que é possível identificar 2 classes principais: uma classe que engloba o corpo e outra classe formada pelos braços dos rios e pelas bordas.

No dia 21 de setembro de 2010 foi identificado um evento de frente fria. No dia anterior à passagem dessa frente, com a análise de cluster o reservatório foi dividido em duas regiões, uma formada pelo corpo e outra formada pelos braços dos rios e por toda a região que contorna o reservatório. No dia 21 as águas foram divididas em 4 classes, depois da passagem da frente fria elas se tornaram mais heterogêneas. Um dia depois do evento, o reservatório foi dividido em 3 grupos, um formado pelas águas do *corpo do reservatório* e outros dois formados pelas áreas de entorno e pelos braços dos rio. Essa seqüência pode ser vista na Figura 4.8.

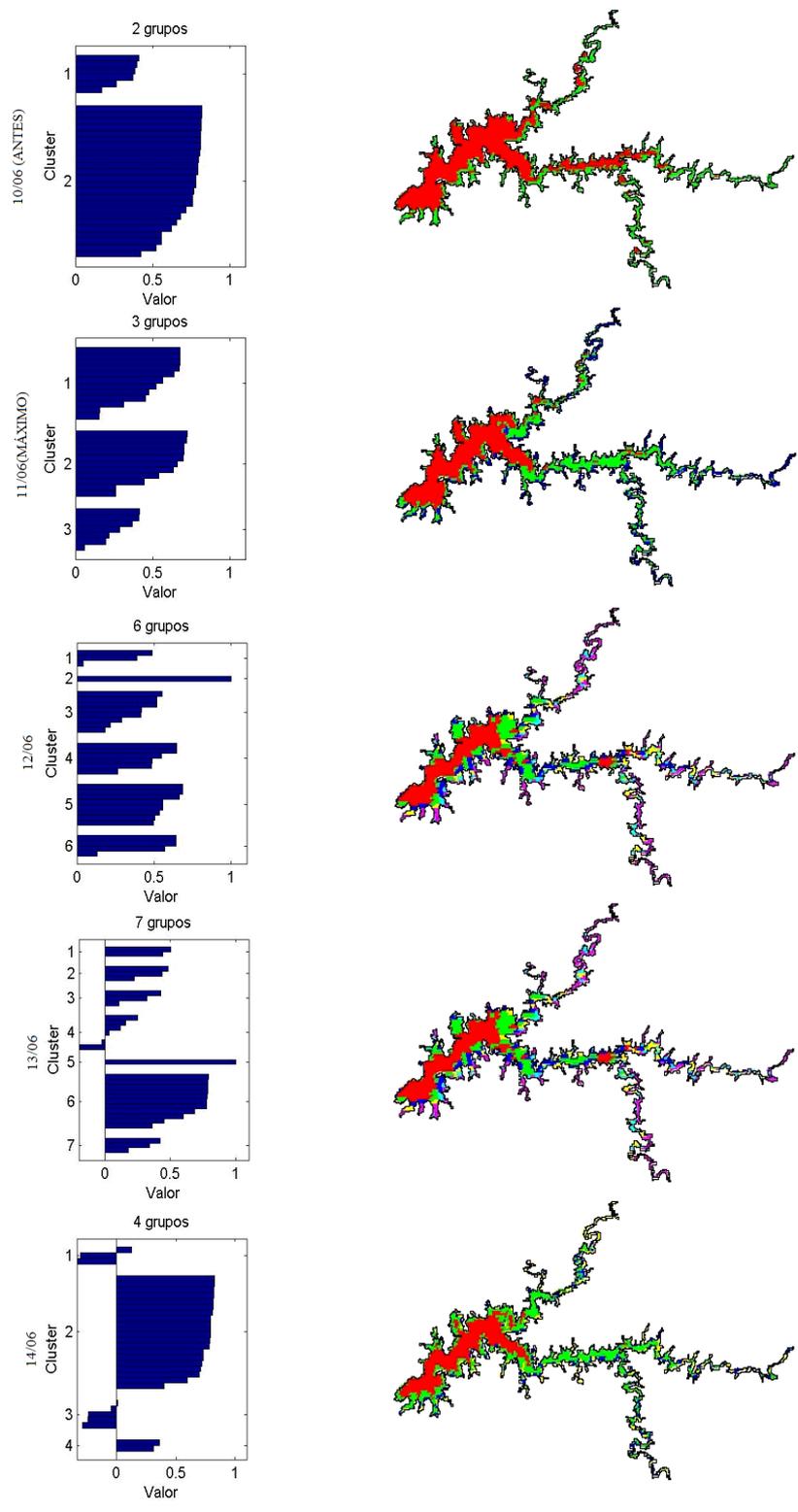


Figura 4.7 - Seqüência de imagens classificadas com o K-médias do período entre os dias 10 e 14 de junho de 2010.

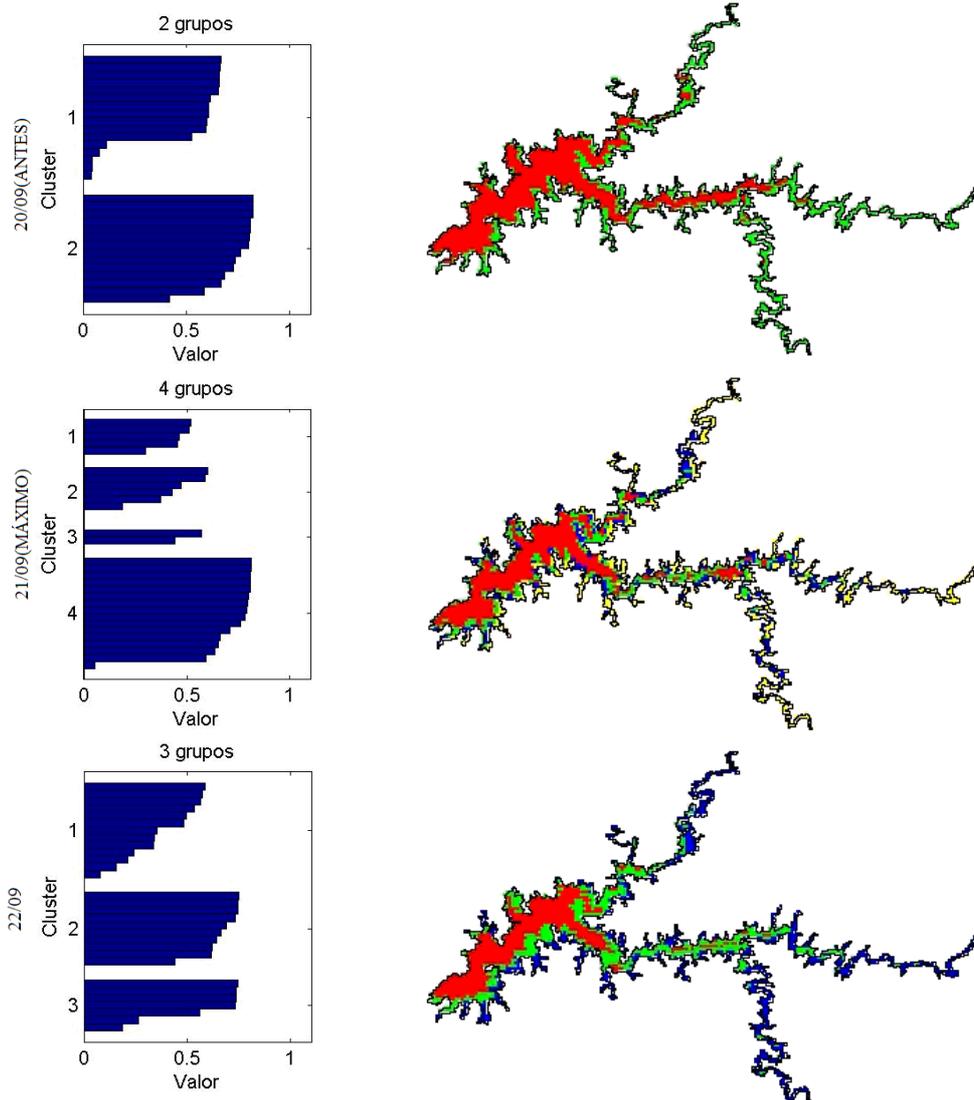


Figura 4.8 - Seqüência de imagens classificadas com o K-médias do período entre os dias 20 e 22 de setembro de 2010.

Apesar de se ter aplicado este procedimento nas imagens de somente dois períodos nos quais houve a passagem de sistema frontal, observa-se que há um padrão em que depois da passagem da frente fria as águas se tornam espectralmente mais heterogêneas, sendo possível dividir as águas em mais regiões espectralmente diferentes. Notou-se também bastante influência das águas dos rios nesses eventos. Uma explicação para isso é que como nesses eventos sempre há um aumento da pluviosidade, ocorre maior aporte de sedimentos e também escoamento da água da superfície do entorno para

dentro dos rios. A região do corpo foi a que se manteve mais estável, contudo é possível identificar que nas margens do reservatório houve maior confusão entre as classes. Isso pode estar associado com a menor profundidade dessa região e com o efeito de borda.

### 4.3 Razão de bandas

No presente estudo, valores estimados através da razão de bandas MODIS foram comparados aos dados da boia SIMA e obtidos em campanhas de campo (Nascimento, 2010). Estas comparações procuraram identificar um meio empírico para estimar as variáveis turbidez e concentração de clorofila. A comparação foi realizada pela análise estatística de regressão. Dentre as comparações feitas entre os dados orbitais e os dados *in situ*, os melhores resultados obtidos para a variável clorofila foram obtidos com a razão entre as bandas 3 (459 - 479 nm) e 4 (545 - 565 nm). As razões entre as bandas espectrais azul/verde são muito utilizadas para estimar clorofila (CANNIZZARO; CARDER, 2005; PEREIRA, 2008). Os trabalhos pioneiros de estimativa de clorofila, como por exemplo, em Gordon (1983) já utilizavam a razão entre essas bandas.

Para a variável turbidez, a comparação mais consistente com os dados *in situ* foi conseguida com a razão entre as bandas 2 (841-876 nm) no infravermelho-próximo e 1 (620 - 670 nm) na região do vermelho. Rodríguez-Guzmán e Gilbes-Santaella (2009) também utilizaram as bandas do vermelho e infravermelho próximo de imagens MODIS para a estimativa de turbidez obtendo bons resultados.

Na tabela 4.3, estão listados os números de pontos que puderam ser comparados para as duas variáveis, assim como os melhores valores de  $R^2$  e erro médio quadrático (EMQ) da comparação entre os dados de campo e os dados de satélite. Observa-se que somente a comparação dos dados de

clorofila com os dados SIMA na época de cheia não se apresentaram significativos ao nível de 95%.

Tabela 4.3 – Validação dos dados estimados pela razão de bandas com dados *in situ*. Valores em negrito: coeficientes de determinação significativos ao nível de 95%.

Período	Campanha de campo		Boia SIMA	
	maio	setembro	novembro até março	março até maio
Número de pontos Clorofila	14	21	11	7
Clorofila ( $R^2$ )	<b>0.5</b>	<b>0.68</b>	<b>0.74</b>	0.28
EMQ	0.12	0.19	0.36	0.10

Período	maio	setembro	outubro até fevereiro	abril até junho
	Número de pontos turbidez	14	19	9
Turbidez ( $R^2$ )	<b>0.87</b>	<b>0.63</b>	<b>0.87</b>	<b>0.52</b>
EMQ	0.17	0.07	0.17	0.54

Os dados de clorofila e turbidez estimados por meio dessa técnica foram essenciais para as análises de compartimentação do reservatório e para a análise da qualidade da água do reservatório sob o efeito da passagem de sistemas frontais.

Hoge et al. (1987) comentam em seu trabalho que o método de razão de bandas é um método muito simples e pode ser utilizado em ambientes aquáticos para estimar concentração de clorofila, sólidos em suspensão e matéria orgânica dissolvida, com análises estatísticas diretas, formando modelos que quantificam esses componentes. Apesar desses modelos gerarem dados comparáveis às medidas coletadas *in situ*, essa prática não fornece um resultado 100% robusto, pois é necessário realizar uma série de procedimentos para que um algoritmo forneça resultados com precisão alta. Isto ocorre mesmo que a base teórica dos algoritmos empíricos seja válida e sua aplicação prática possível, como foi mostrado em vários trabalhos

(LUNETTA et al., 2009; MUHAIRI et al., 2009; OUIILLON et al., 2008; PEREIRA, 2008).

Para a clorofila, a razão entre a banda de absorção na região do vermelho e a banda da região do infravermelho próximo, em aproximadamente 700 nm, conhecida como “NIR/red” é bastante citada na literatura. Para a banda azul, a região em 440 nm é caracterizada pelo pico de absorção máximo pela clorofila e a região entre aproximadamente 550 e 555 nm é caracterizada pela absorção mínima pelo fitoplâncton. Por isso tais regiões são escolhidas (CANNIZZARO; CARDER, 2006).

Segundo Kirk (1994) e Hoge et al. (1987), a utilização da razão espectral nos intervalos da região do azul (400 a 551 nm) e do verde (515 a 600 nm) tem gerado resultados bastante robustos para a estimativa de concentração de componentes opticamente ativos na água. Porém é necessário ter uma concentração mínima da componente em análise no ambiente aquático para que a estimativa seja acurada.

#### **4.4 Análise da qualidade da água do reservatório de Itumbiara sob o efeito da passagem de sistemas frontais**

Para a análise dos efeitos dos eventos frontais na qualidade da água do reservatório de Itumbiara utilizou-se os dados de reflectância extraídos das imagens e estimados os valores dos parâmetros de turbidez e clorofila a partir da razão de bandas.

Os dados de clorofila estimados podem ser observados na Figura 4.9. Nota-se que depois da passagem da frente fria, há um aumento da quantidade de clorofila, pois com a utilização do teste ANOVA, foi possível determinar que os valores são estatisticamente diferentes ( $p = 2,64E-05$ ) no nível de 95% de significância.

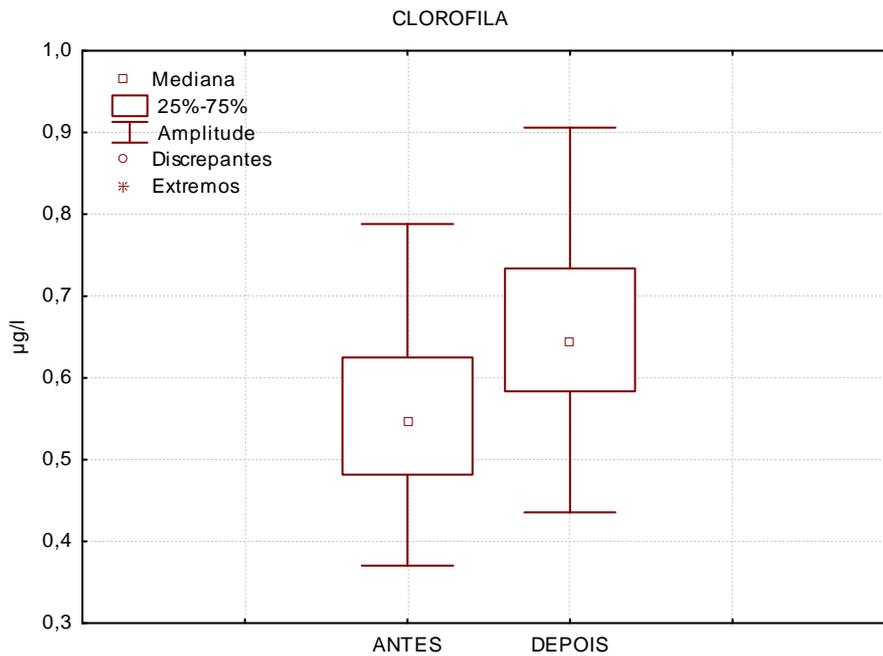


Figura 4.9 - Comparação entre os valores de clorofila estimados de antes e depois da passagem das frentes frias.

Para o parâmetro estimado turbidez as médias mantiveram-se em torno de 1,5 NTU. Houve maior variação entre os dados dos períodos anterior às frentes a variância foi de 121,92 para os dados de antes e 83,82 para os dados de depois da passagem das frentes. Como pode ser observado na Figura 4.10.

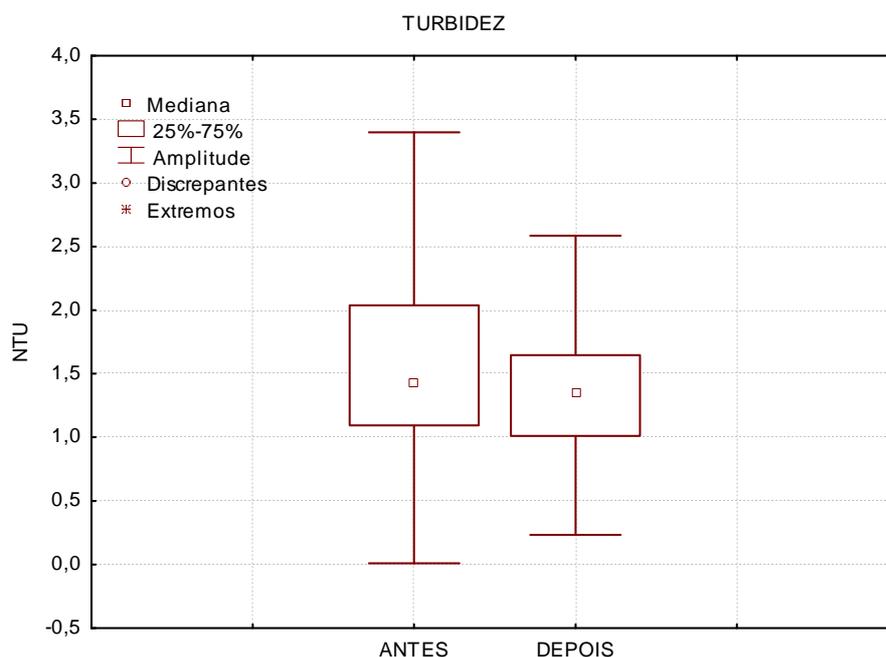


Figura 4.10 - Comparação entre os valores de turbidez estimados de antes e depois da passagem das frentes frias.

As informações de antes e depois de 10 eventos frontais foram utilizadas para a realização de uma estatística básica, onde foram calculados os valores (normalizados) médios, máximos e mínimos de cada variável. Essas informações são apresentadas na Tabela 4.4. Apesar das medidas de todas as variáveis usadas nessa estatística serem das datas de um dia antes e um dia depois das frentes frias notou-se que algumas das variáveis apresentaram respostas com variação temporal diferenciada. Isso se deve ao fato de que as variáveis limnológicas são dependentes umas das outras. Contudo, a diferença entre as variáveis de antes e depois da passagem do sistema frontal já é suficiente para observar esses padrões de variação.

Tabela 4.4 - Valores (normalizados) máximo, médio e mínimo dos parâmetros limnológicos medidos pela boia SIMA antes e depois da passagem das frentes frias.

	ANTES			DEPOIS		
	mínimo	média	máximo	mínimo	média	máximo
<b>Condutividade, média</b>	0.0380	0.0886	0.1139	0.0380	0.0911	0.1392
<b>Conc. de OD, média</b>	0.1082	0.3400	0.9942	0.1094	0.1523	0.1803
<b>pH, média</b>	0.1126	0.5839	0.9387	0.1308	0.5728	0.9702
<b>Conc. de NH4+, média</b>	0	0.3854	0.9321	0.0010	0.4431	0.8803
<b>Conc. de NO3-, média</b>	0.0446	0.0496	0.0572	0	0.0418	0.0696
<b>Turbidez, média</b>	0.0004	0.1237	0.2983	0.0009	0.1488	0.3786
<b>Clorofila, média</b>	0.0029	0.0417	0.1912	0.0046	0.1508	0.5432

Nota-se que depois dos eventos, a média da concentração de Oxigênio Dissolvido (OD) diminui de 0.3400 para 0.1523. As taxas de OD nos corpos hídricos é de fundamental importância para a manutenção das comunidades aquáticas aeróbias. Um decréscimo nos teores de OD provoca, entre outros efeitos, a morte de peixes e demais organismos aquáticos (REBOUÇAS, 2002). Segundo Esteves (1988), fortes déficits de oxigênio em toda a coluna d'água podem ocorrer eventualmente, quando por ação de ventos fortes, a estratificação térmica é desfeita. Nestas condições a água do hipolímnio enriquece a água epilímnica com compostos redutores, como matéria orgânica em diferentes estados de decomposição, amônio, gás sulfídrico e metano, que ao se oxidarem consomem grande parte ou a totalidade do oxigênio dissolvido da coluna d'água.

A mistura vertical e horizontal que ocorre após a passagem de frentes frias tem impactos e consequências sobre a dinâmica das comunidades fitoplanctônicas e nos padrões de mistura dos ecossistemas de água doce. Turbulência intensa antes e durante os eventos de frentes frias causa mistura promovendo o crescimento de diatomáceas e Chlorophyceae durante estes períodos (THORNTON, 1990). Com os dados de clorofila medidos pela boia antes e depois da passagem das frentes frias nota-se que houve um aumento considerável da variável, antes da passagem a média era de 0.0417 e depois de 0.1508. Apesar da magnitude da variação dos dados estimados ser menor do que a dos dados medidos pela boia, os resultados para as duas análises são concordantes. Além disso, os dados medidos pela boia são de apenas um ponto amostral, já os dados estimados foram contabilizados em todos os compartimentos do mesmo.

Os dados medidos pela boia da variável turbidez mostraram um aumento de 0.1237 para 0.1488 depois da passagem da frente, resultado diferente em comparação com os dados estimados, onde a variação da turbidez se manteve. Essa diferença pode ser explicada também pela quantidade de pontos amostrais, com os dados estimados por meio das imagens pôde-se usar informações de todo o reservatório.

Considerando as variáveis medidas pela boia SIMA durante a passagem da frente fria observada entre os dias 17 e 24 de abril de 2010, nota-se que o valor máximo da variável turbidez (0.7511) foi registrado 4 dias depois do começo do evento. Esse valor foi quase 8 vezes maior do que o valor registrado antes da passagem da frente. Comparando à estatística básica mostrada na Tabela 4.4, observa-se que os valores de depois da passagem da frente fria também são maiores. Porém, essa diferença foi menos acentuada. Depois de três dias, o valor da clorofila foi 5 vezes maior do que na data inicial. A concentração de nitrato (Figura 4.9A) no dia inicial tinha uma média de 0.04626 e no final do período da frente, o valor diminuiu para 0.04603. Porém, 9 dias depois do

começo do evento foi registrado uma média de 1, ou seja, houve um aumento considerável já que foi registrado o maior valor de toda a série.

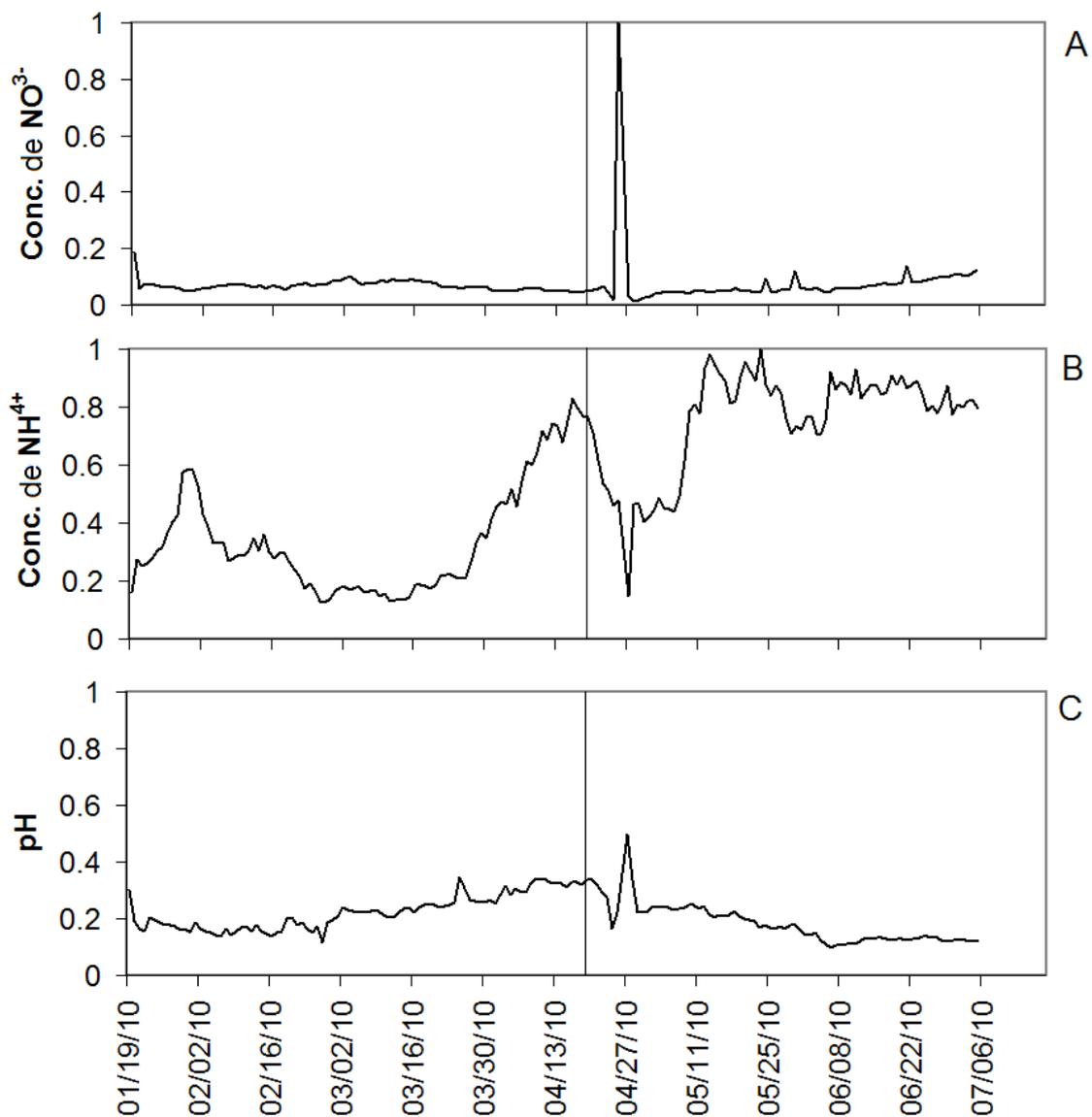


Figura 4.11 - Variação das concentrações de nitrato (A), amônia (B) e pH (C) medidos pela boia SIMA. O período de ocorrência da frente fria está marcado na série.

As medidas de condutividade e pH (Figura 4.11C) foram menores na data posterior à passagem da frente fria, respectivamente 0.1622 e 0.0506. Porém,

3 dias depois do final do evento os valores aumentaram para 0.4966 and 0.1265, respectivamente.

A variável amônia (Figura 4.11B) no dia inicial tinha um valor de 0.7941 e diminuiu gradativamente até atingir o valor mínimo de 0.1465, também no décimo primeiro dia depois do começo (como o pH e a condutividade).

Esses valores foram observados em apenas um caso de passagem de frente fria para servir como exemplo. No entanto, a dinâmica entre esses elementos é complexa e exige uma análise na dimensão espacial, já que os dados foram obtidos apenas em um ponto do reservatório.

De acordo com Carlile et al. (1989), é necessário determinar a escala de mensuração mais adequada para diferentes processos ou propriedades físicas sendo que diferentes escalas de medidas são necessárias par estudar os vários processos influenciando um fenômeno. A heterogeneidade espacial parece restringir a possibilidade de transpor informação de uma escala para outra. Todavia, em paisagens heterogêneas as medidas obtidas em escalas mais finas geralmente não podem ser somadas diretamente para produzir estimativas regionais. Médias ponderadas nem sempre produzem mensurações razoáveis porque a heterogeneidade pode influenciar o processo de modo não linear.

#### **4.5 Análise da compartimentação**

Paisagens são mosaicos gerados por processos de perturbação ambiental que variam em escala, extensão e intervalo de recorrência (HAFFER, 1992). Como mencionado anteriormente, a fluidez da água e a heterogeneidade das respostas das variáveis nas diferentes zonas que compõem o reservatório dificultam a definição de compartimentos dentro desses ambientes. De acordo com Thornton (1990), os reservatórios podem ser divididos em zona de influência do rio, zona de transição e zona lacustre. Deve-se enfatizar que os

limites entre essas zonas são freqüentemente difíceis de se delimitar e esses locais muitas vezes são instáveis em diferentes períodos.

Devido à redução na velocidade da água e conseqüente rápida sedimentação do material carregado pelos rios, o que ocorre nos pontos iniciais dos reservatórios, a concentração de sedimentos tende a reduzir à medida que se aproxima da barragem. Desta maneira, forma-se um gradiente longitudinal muito comum em reservatórios no período de chuvas (LEITE, 1998; MENDONÇA, 2007; ZANATA; ESPINDOLA, 2002).

Ecossistemas lóticos são caracterizados por gradientes longitudinais havendo interferência da morfologia, velocidade do fluxo, temperatura da água e tipo de substrato que formam a bacia. Já os gradientes verticais de luz, temperatura, substâncias dissolvidas, processos de produção e decomposição são fatores primários que interferem nas características de ambientes lênticos. Em virtude da natureza híbrida dos reservatórios, eles possuem gradientes horizontais e verticais dos fatores abióticos que delimitam a produção primária. É importante ter noção dessa característica híbrida dos reservatórios para se fazer interpretações quanto à heterogeneidade espacial das variáveis limnológicas encontradas dentro desses ambientes (THORNTON, 1990).

A turbidez da água é uma medida da sua capacidade de dispersar a radiação e, portanto, está relacionada à presença de compostos suspensos na água e pode ser considerada como o inverso da transparência. O coeficiente de atenuação vertical da luz calculado em função dos valores de transparência é uma medida indireta da atenuação da radiação solar que penetra a água e varia em função dos compostos dissolvidos ou em suspensão na mesma (WETZEL, 2001).

Com a série de imagens foi possível verificar, por meio de uma análise qualitativa, que em quase todos os meses do ano o reservatório permaneceu compartimentado. No entanto, no inverno (estação seca), a zona de influência dos rios apresentou águas menos turbidas do que nas estações chuvosas. Isso

pode ser explicado pelo fato de que quando existe muita precipitação ocorre aporte de material alóctone e material em suspensão, aumentando a turbidez dessas áreas. De maneira oposta, na estação seca, ocorre menor quantidade de material carregado pelos rios e assim a transparência das águas nessa época é maior.

A composição R(1) G(4) B(3) (Figuras 4.12B e 4.12D) foi bastante eficiente em mostrar a diferença da reflectância entre os compartimentos das águas do reservatório. Entretanto, algumas vezes a imagem aparece com menor nitidez, em comparação com outras combinações de bandas que em geral, deixam as águas do reservatório bem escuras. A composição empregada nas Figuras 4.12B e D ressaltou o gradiente existente entre as águas turbidas (verde ou marrom) e as águas mais limpas (preto). É possível notar através das Figuras 4.12B e 4.12D que mesmo em épocas distintas, o gradiente entre a região de influência do rio e a zona lacustre se mantém. Já a clássica composição R(7) G(2) B(1), comumente utilizada para estudos de comportamento espectral da água, não mostra de maneira tão nítida esse gradiente (Figuras 4.12 A e 4.12 C). Nas imagens com essa composição clássica, R(7) G(2) B(1) (Figuras 4.12 A e 4.12 C), as áreas onde a água é turbida é apresentada com a coloração azul. Pode-se observar que tal combinação mostra a imagem do período seco pouco compartimentada em relação à imagem do período de cheia.

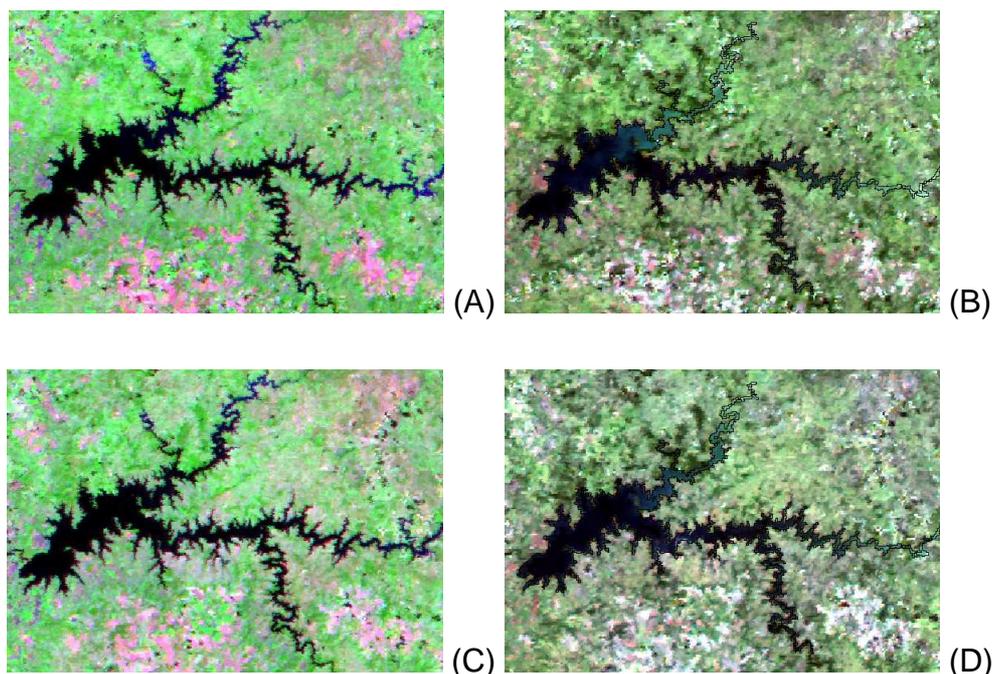


Figura 4.12 – Imagens médias 8 dias MODIS do período entre os dias 2 - 9 de fevereiro de 2010 (A e B); e imagem MODIS do período entre os dias 18 - 25 de junho de 2010 (C e D). Foi utilizada a composição R(7) G(2) B(1) para as imagens da esquerda, A e C; e as imagens da direita, B e D, têm composição R(1) G(4) B(3).

Com essa análise visual do reservatório de Itumbiara, foi possível estabelecer que o *corpo do reservatório* apresenta um comportamento diferenciado em relação aos braços dos rios que o formam, o que também foi observado com a aplicação da técnica de análise de Cluster. Nascimento (2010) divide o reservatório de Itumbiara em dois compartimentos: Corpo e rio Corumbá. Contudo, os braços dos rios Araguari e Paranaíba não são considerados. Portanto, buscou-se estabelecer compartimentos com os dados turbidez e clorofila estimados empiricamente pela razão de bandas que podem ser vistos nas Figuras 4.13 e 4.14. Foram consideradas 4 regiões de interesse: Araguari, Corumbá, Corpo e Paranaíba.

No período estudado, a turbidez do rio Araguari apresentou a maior média e a maior variação desses valores (Figura 4.13). A partir do teste de Scheffe, de comparação de pares de médias, foi possível verificar que a média da turbidez desse rio é estatisticamente diferente dos demais compartimentos. Os braços

dos rios Corumbá e Paranaíba, obtiveram médias estatisticamente iguais e a região do *Corpo do reservatório* apresentou a menor média, também considerada estatisticamente diferente das demais. Os mesmos resultados foram encontrados nos testes de Bonferroni (diferenças entre as médias) e Fisher LSD.

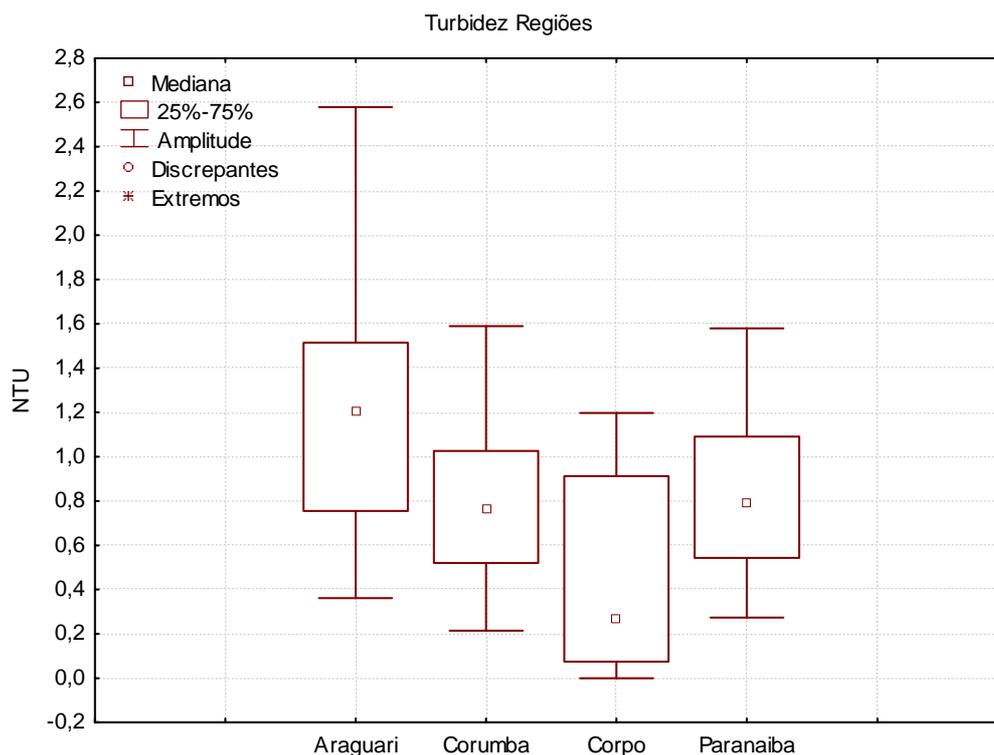


Figura 4.13 - Comparação dos valores estimados para a variável turbidez obtidos com a razão entre as bandas 2 (841 - 876 nm) no infravermelho - próximo e 1 (620 - 670 nm) na região do vermelho para definição de regiões no reservatório de Itumbiara. Os valores utilizados são da série temporal de imagens MODIS (composição de 8 dias).

Para os dados de clorofila estimados (Figura 4.14), com a utilização dos mesmos testes, obteve-se que o compartimento *Corpo do reservatório* apresenta valores estatisticamente diferentes comparados aos demais compartimentos. A média da clorofila nessa região foi maior do que nas outras.

As zonas de influência dos rios em reservatórios operam como um rio largo e turbulento, no qual a turbulência, a instabilidade no aporte de sedimentos e a disponibilidade de luz diminuída impedem a fotossíntese, apesar da alta carga de nutrientes disponíveis nesses locais (THORNTON, 1990).

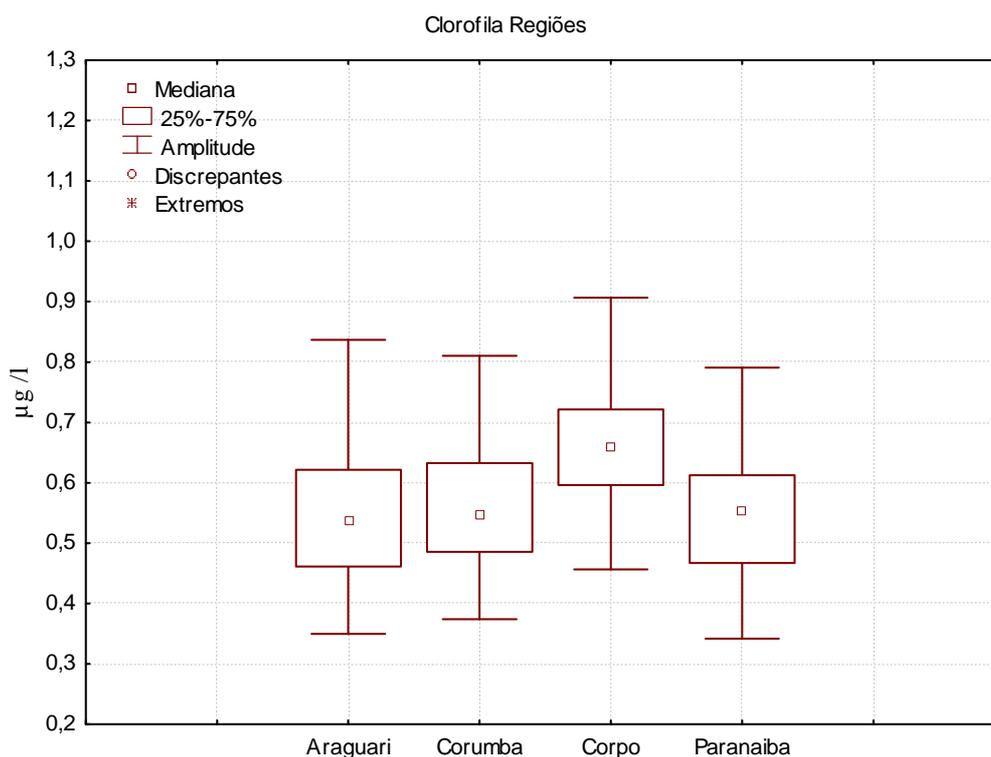


Figura 4.14 – Comparação dos valores estimados para a variável clorofila obtidos com a razão entre as bandas 3 (459 - 479 nm) e 4 (545 - 565 nm) para definição de regiões no reservatório de Itumbiara. Os valores utilizados são da série temporal de imagens MODIS (composição de 8 dias).

Esta maior concentração de clorofila no compartimento *Corpo do reservatório* pode estar associada à precipitação dos sedimentos inorgânicos em suspensão antes de chegar à barragem, possibilitando maior penetração de luminosidade na água e aumentando a zona eufótica, o que propicia o

surgimento de uma maior concentração de clorofila. Este fato está associado à precipitação gradual de sedimentos devido à redução da velocidade do fluxo da água.

Dessa forma, com as variáveis estimadas por meio das imagens de satélite, pode-se concluir que o reservatório estudado é dividido em três compartimentos: Região *Corpo do reservatório*, Região Araguari e Região Corumbá/Paranaíba.

#### **4.6 Estabilidade Relativa da Coluna Água**

O período de estudo utilizado para a aplicação dessa técnica foi delimitado pela disponibilidade dos dados da boia SIMA. O conjunto de dados contínuos do perfil de temperatura mais consistente foi entre as datas de 19 de janeiro de 2010 até 18 de julho de 2010. Como esse método indica o grau de estabilidade da coluna d'água como um todo, no período analisado pôde-se observar através da Figura 4.15 que as águas do reservatório de Itumbiara na área próxima à barragem (local da boia SIMA) se mantiveram estratificadas em quase todo o período analisado. A estabilidade não foi mantida apenas no período de inverno, principalmente entre os dias 21 e 23 de junho, quando houve uma súbita diminuição da estabilidade relativa. No dia 23 a coluna d'água ficou totalmente misturada, foi quando a estabilidade relativa foi nula.

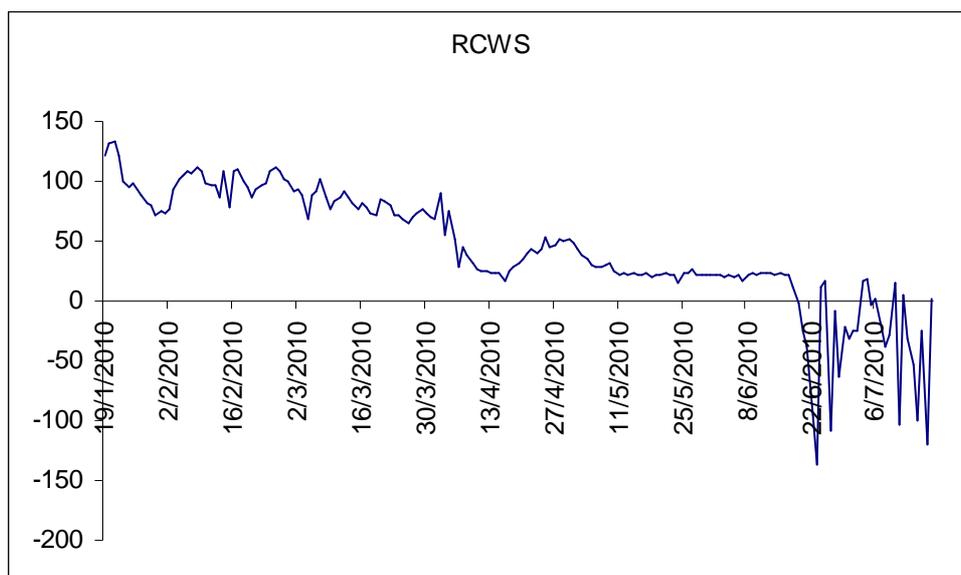


Figura 4.15 - Série da Estabilidade Relativa da Coluna D'água (RWCS) próximo à barragem, do período de janeiro de 2010 a julho de 2010.

No verão em regiões tropicais, os níveis de água estão, no geral, mais elevados. Nessa estação do ano, observam-se freqüentemente estratificações duradouras, que se mantêm por todo esse período. Este fenômeno é resultante da pouca variação diária de temperatura do ar, que para o ecossistema aquático implica em reduzidas perdas de calor para a atmosfera, mesmo no período da madrugada. Outro fator que dificulta a desestratificação diária nesse período é a maior profundidade da coluna d'água (ESTEVES, 1988).

Alcântara (2010) classifica o reservatório de Itumbiara como monomítico, ou seja, apresenta um único período de mistura durante o ano. Com a observação de dados *in situ*, este autor nota que de junho a setembro há mistura da coluna d'água e de outubro a maio as águas se mantêm estratificadas. O autor ainda observa que as passagens de frentes frias também atuam na perda de calor armazenado na coluna d'água, assim como na sua desestabilização, promovendo processos de mistura convectiva. Apesar do conjunto de dados utilizados no presente trabalho ser relativamente limitado, esse padrão de mistura no período de inverno também foi notado. Também, deve-se ressaltar que o período de inverno foi quando ocorreram a maior quantidade de frentes

frias registradas no estudo. Branco et al. (2009) também observaram uma maior mistura no período de inverno nesse reservatório.

Na Figura 4.16, tem-se uma série temporal do perfil vertical da coluna d'água do reservatório de Itumbiara entre janeiro de 2010 e julho de 2010. Nota-se que nos meses de inverno, em algumas ocasiões a coluna d'água apresenta-se bem misturada em relação aos outros períodos da série estudada.

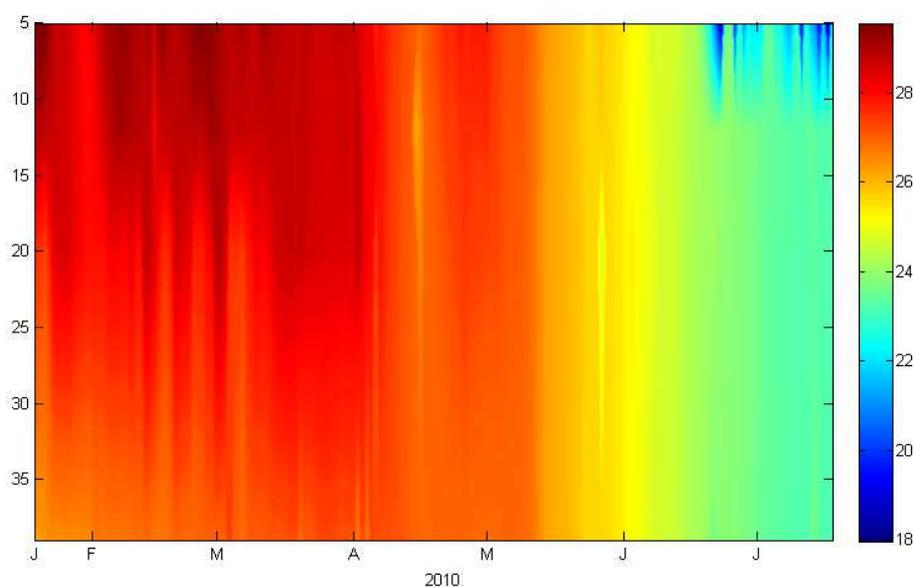


Figura 4.16 - Variação temporal da temperatura (°C) da coluna d'água no reservatório de Itumbiara medida pela boia SIMA no período entre janeiro e julho de 2010.

A resistência relativa térmica (RTR) de mistura entre as massas de água foi calculada em 3 intervalos: de 5 m a 12 m, de 12 m a 20 m e de 20 m a 39 m. Pela Figura 4.17 pode-se observar que a maior mistura ocorreu entre o intervalo de 5 a 12 metros no mesmo período quando a RWCS foi menor.

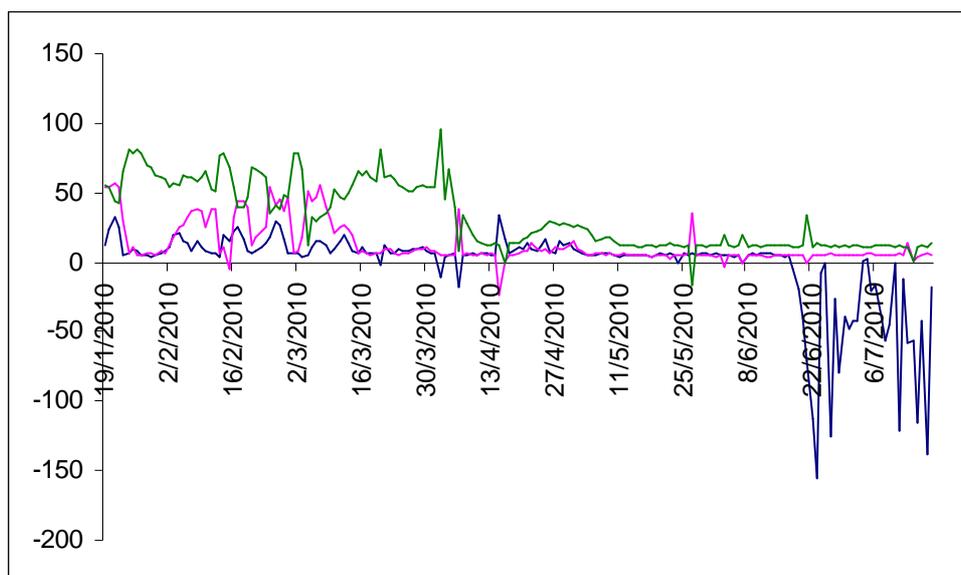


Figura 4.17 - Série da resistência relativa térmica (RTRM) próximo à barragem, do período de janeiro de 2010 a julho de 2010.

Com uma comparação empírica entre os dados da temperatura na parte mais superficial do reservatório (5 metros) e os valores de RWCS mostra uma relação positiva entre essas medidas, mostrando que a camada superficial tem grande influência na estabilidade da coluna d'água ( $R^2 = 0,88$ ), como mostrado na Figura 4.18.

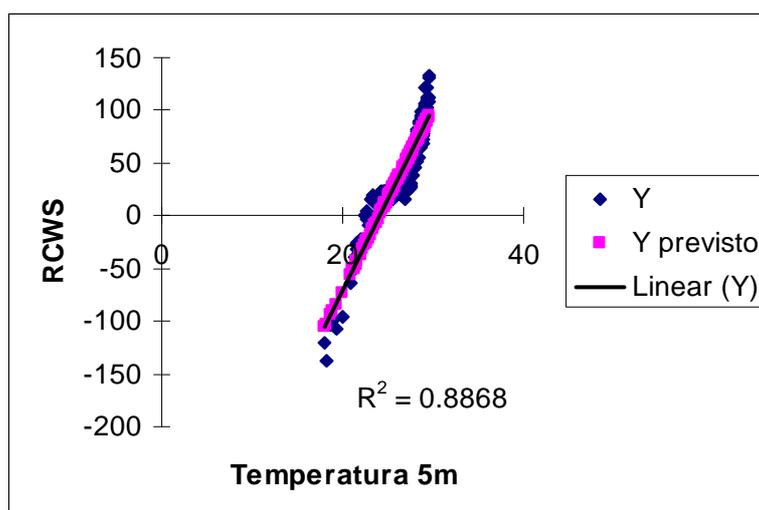


Figura 4.18 - Relação entre a temperatura em 5 metros de profundidade e a estabilidade relativa da coluna d'água, com os dados da boia SIMA para o período entre janeiro de 2010 e julho de 2010.

#### 4.7 Modelo Linear de Mistura Espectral

A partir da aplicação da ferramenta *Spectral Hourglass Wizard* do software ENVI<sup>®</sup> foi possível construir mapas de abundância dos componentes opticamente ativos presentes nas águas do reservatório para a série de 72 imagens que abrangeu as datas entre 20 de setembro de 2009 a 30 de março de 2011.

As seleções de perfis espectrais representativos foram feitas utilizando-se as próprias imagens, e foram selecionados os pixels que continham curvas espectrais que melhor expressassem a composição óptica da água do reservatório levando em consideração a presença de clorofila (CLO), matéria orgânica dissolvida colorida (MOD) e material particulado inorgânico em suspensão (MPI). Na Figura 4.19, estão expostas as médias dos valores de reflectância dos *endmembers* selecionados para a série de imagens usadas na aplicação do MLME (KIRK, 1994; IOCCG, 2000; MOBLEY, 2004).

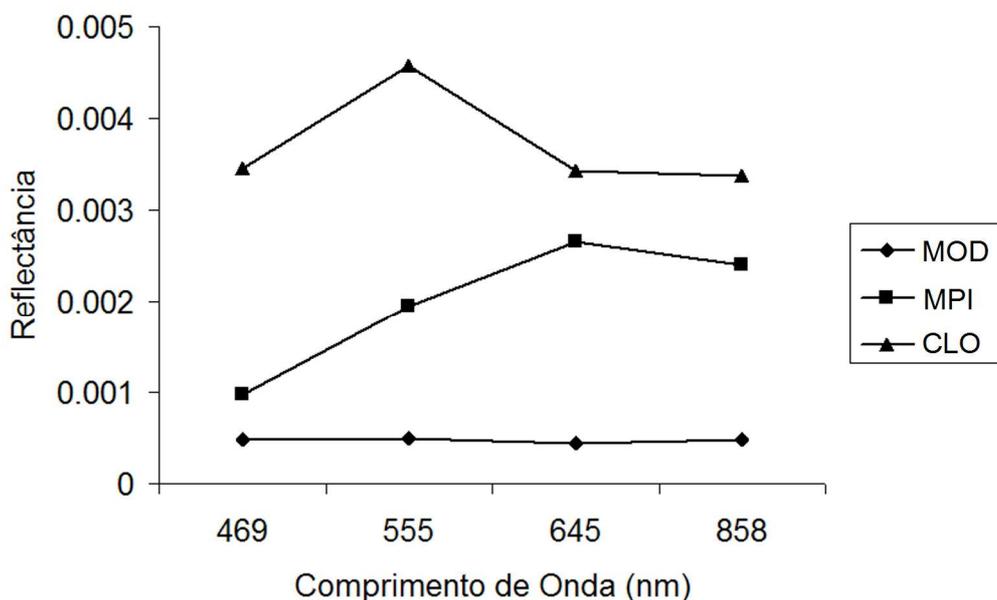


Figura 4.19 - Média dos valores de reflectância dos *endmembers* selecionados para a série de imagens. O eixo X representa o comprimento de onda (nm) das amostras e o eixo Y representa a média das respostas espectrais dos COA: MOD (matéria orgânica dissolvida colorida), MPI (Material particulado inorgânico em suspensão) e CLO (clorofila).

O MLME gera imagens fração onde a contribuição de cada COA selecionado varia de 0 a 1. Para exemplificar o resultado da aplicação do MLME, foi selecionada a imagem MODIS média de 8 dias referente ao período de 14-21 de abril de 2010. Os mapas resultantes de cada fração, abundância de MOD, CLO e MPI, estão na Figura 4.20A, 4.20B e 4.20C, respectivamente. Também foi realizada uma composição RGB com os mapas dessas frações para uma melhor visualização dos resultados, sendo MPI na banda do vermelho, CLO na banda do verde e MOD na banda do azul.

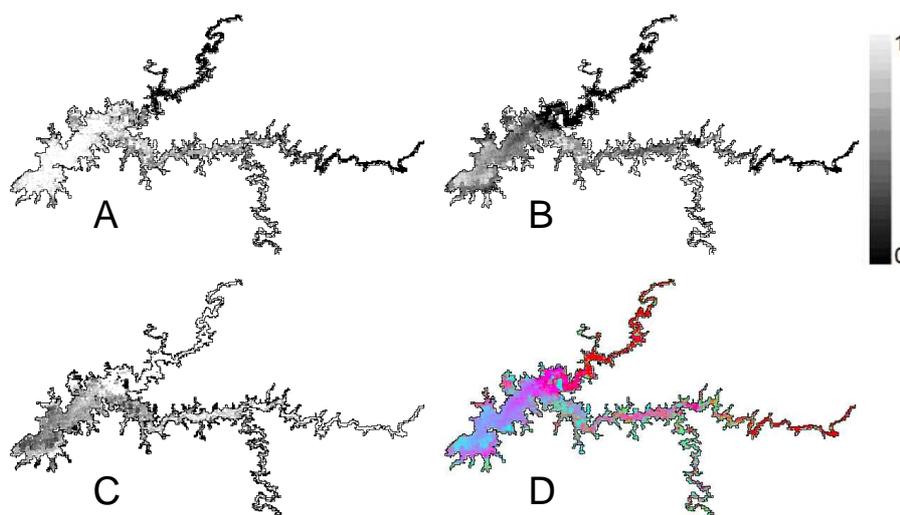


Figura 4.20 - Imagens fração e composição colorida da imagem média 8 dias MODIS de 14-21 de abril de 2010. (A) Abundância de MOD, (B) CLO, (C) MPI e (D) composição colorida R(A) G(B) B(C).

RUDORFF et al. (2011) em um estudo sobre a pluma do rio Paraíba do Sul observaram que a técnica do MLME mostrou-se mais vantajosa em relação à outras metodologias. Essa técnica também foi eficiente quando aplicada em ambientes de várzea (NOVO et al. 2006; ALCÂNTARA et al., 2008) e útil para a separação dos COA no Reservatório de Manso (VALERIO et al. 2011). No

presente trabalho a técnica foi aplicada em uma série temporal, isso permitiu observar as variações sazonais dos componentes.

#### 4.8 Classificação por Fatiamento

Mesmo com o auxílio da ferramenta *Spectral Hourglass Wizard* do ENVI<sup>®</sup>, em algumas imagens a seleção dos *endmembers* não foi trivial, já que a reflectância da água do reservatório era muito baixa em todas as bandas aqui utilizadas. Isso fez com que o MLME superestimasse a abundância dos elementos em algumas imagens.

Uma solução para esse problema foi a aplicação de uma classificação por fatiamento (*Density Slice*) em cada fração. Assim, o intervalo de valores pôde ser padronizado.

A Figura 4.21 mostra o resultado da classificação por fatiamento da fração detritos (MPI) gerada no MLME da imagem média de 8 dias (14 - 21 de abril de 2010). O tamanho de cada pixel na imagem equivale a 231,65 m. Dessa forma, a área do reservatório é representada por 9.370 pixels. Nesse caso, 4.509 pixels foram incluídos na classe vermelho, ou seja, em quase 50% da imagem há contribuição de 80 a 100% do elemento MPI.

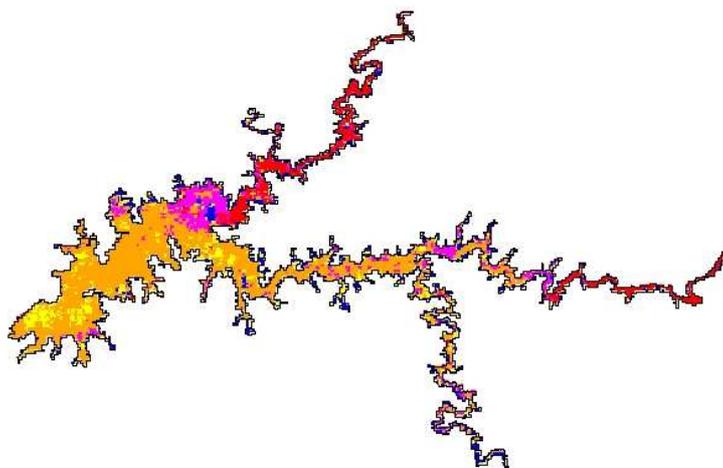


Figura 4.21 - Classificação por fatiamento da fração MPI gerada pelo MLME da imagem média de 8 dias de 14-21 de abril de 2010.

Como esse procedimento foi realizado em todas as imagens, para facilitar a visualização dos resultados, foi feito um gráfico de barras (Figura 4.22), onde o número de pontos inseridos na classe com contribuição de 80-100% (vermelho) de cada fração, MOD, MPI e CLO, foi mostrado em série, respectivamente. Na Figura 4.22, em preto têm-se o número de pixels das imagens-fração com mais de 80% de contribuição de MOD. As frações de MPI e CLO são representadas, respectivamente, pelas cores cinza claro e cinza escuro.

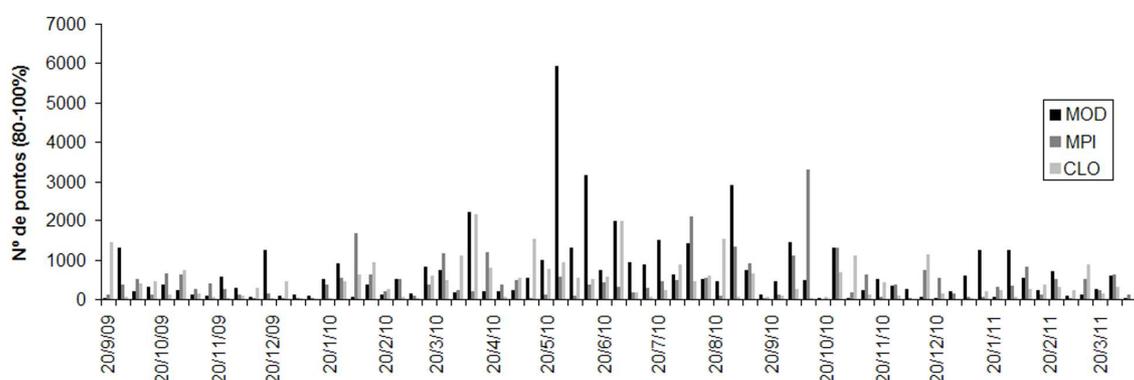


Figura 4.22 - Quantidade de pontos com contribuição maior do que 80 % das imagens fração geradas pelo MLME aplicado à série de imagens médias de 8 dias de setembro de 2009 à março de 2011.

Nota-se que no período de inverno, entre os dias 140 e 240 do calendário Juliano, existem algumas imagens fração de MOD que registraram grande quantidade de pixels contendo mais de 80% deste COA, indicando uma dominância de Matéria Orgânica Dissolvida nesse período. Nascimento (2010) observa que existe uma dominância de MOD na região do braço rio Corumbá e que esse rio exerce forte influência no sistema como um todo.

#### 4.9 Análise da Contribuição Relativa dos COA

Com os resultados da aplicação do MLME nas imagens do reservatório se extraíram valores da abundância dos COA na série temporal. Esses valores

foram usados para medir a contribuição relativa desses elementos, no reservatório e os resultados foram mostrados nos diagramas triangulares a seguir (Figura 4.23).

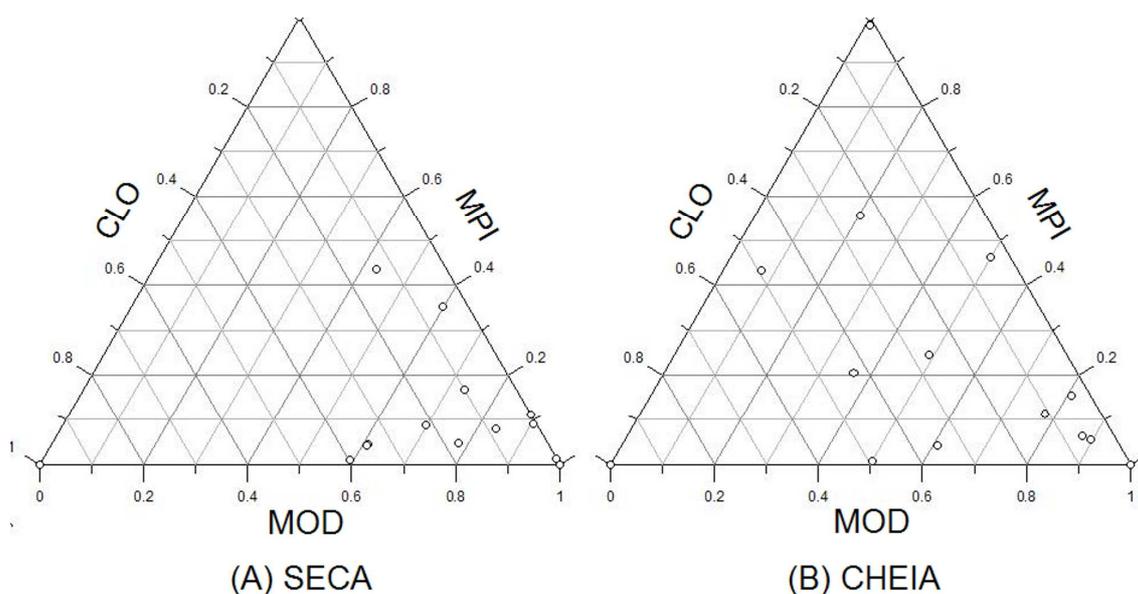


Figura 4.23 - Diagramas triangulares indicando a contribuição dos COA para os períodos de (A) seca e (B) cheia para a série temporal de valores estimados com o MLME aplicados nas imagens médias de 8 dias.

Foi observado que nos dados do período de seca do reservatório houve uma maior contribuição de MOD nas amostras. No período de cheia, houve variação da dominância dos COA. Como o período de cheia coincide com a estação chuvosa, houve maior variação na concentração dos COA, não sendo possível identificar a dominância específica.

Essa variação de dominância dos elementos no período de cheia ocorre porque com as chuvas há maior quantidade de matéria orgânica e inorgânica que chegam ao reservatório com as águas dos rios. No estudo de Nascimento (2011), também foram encontrados valores significativos de MOD. Contudo, nos dados de contribuição relativa, o autor encontrou uma dominância por detritos. Segundo o mesmo autor, a grande quantidade de MOD presente no

período da cheia pode ser explicada pelo fato do nível da água do reservatório variar em torno de 10 metros de um período para o outro. Assim, quando o nível aumenta, a água deixa toda a vegetação que cresceu durante o período de seca submersa, contribuindo para o aumento da MOD.

Por meio das técnicas de processamento digital aplicados aos dados de sensoriamento remoto foi possível identificar que o reservatório de Itumbiara possui variação sazonal em relação à dominância dos COA e a MOD tem forte influência nesse ambiente.



## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com a série de dados do sensor MODIS e da boia SIMA foi possível avaliar satisfatoriamente a influência das frentes frias sobre as variáveis que alteraram a qualidade das águas do Reservatório de Itumbiara, GO. Observou-se que a passagem de frentes frias muda significativamente o comportamento dos parâmetros limnológicos.

As informações meteorológicas temporais obtidas pela boia SIMA e pelos dados de PCD foram de extrema importância para a identificação de padrões sazonais e de influência de sistemas transientes que agiram sobre a região do reservatório. Notou-se que no período de inverno, especificamente nos meses de maio a agosto foram contabilizadas as maiores quantidade (5) de eventos de frentes frias.

As técnicas de processamento aplicadas aos dados orbitais do sensor MODIS auxiliaram no entendimento dos processos que causam variações nos padrões sazonais do reservatório. Com a aplicação da técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral, conseguiu-se diferenciar os componentes opticamente ativos na água. No período de seca o reservatório apresentou valores significativos de matéria orgânica dissolvida colorida. Além disso, pôde-se estimar por meio de razões de bandas valores comparáveis aos parâmetros medidos em campo, também pôde-se definir os padrões de compartimentação das águas do reservatório, onde foram encontrados 3 compartimentos (*Corpo do reservatório*, braço dos rios Corumbá e Paranaíba e braço do rio Araguari). Esse estudo colabora com as estratégias de manejo e gestão de qualidade da água para o reservatório de Itumbiara.

Apesar dos dados apresentados nesse trabalho serem válidos, mais campanhas de campo devem ser realizadas para a geração de modelos empíricos mais robustos. A metodologia apresentada nesse trabalho também pode ser aplicada em outros reservatórios, as técnicas convencionais de limnologia possuem limitações em relação à disponibilidade espacial e

temporal das informações e o sensoriamento remoto é uma ferramenta importante para o manejo da qualidade dos recursos hídricos e para o entendimento de padrões sazonais.

Com a aplicação da técnica de análise de cluster, observou-se o comportamento das águas da superfície do reservatório, onde depois dos eventos de frente fria elas se tornaram mais heterogêneas.

A técnica de análise da estabilidade relativa da coluna d'água foi utilizada para identificar o padrão de mistura vertical ao longo do tempo no reservatório. No período de inverno, foram registrados os menores valores de estabilidade.

Apesar da quantificação dos eventos de frente fria concordarem com os valores observados em vários trabalhos de climatologia desses eventos, deve-se salientar que esses padrões anuais foram obtidos apenas para o período da série de estudo, totalizando pouco mais de dois anos. Então, para se obter resultados mais robustos, deve-se no mínimo observar uma década para poder definir padrões mais consistentes.

Recomenda-se para trabalhos futuros, um melhor entendimento da região do entorno do reservatório com trabalhos de campo para definir com precisão o uso e ocupação dessas áreas.

Para um melhor entendimento dos padrões sazonais e de qualidade da água do reservatório sugere-se a instalação de mais boias SIMA ou realização de campanhas de campo freqüentes, pois com mais pontos de coleta as análises podem ficar mais consistentes e gerar resultados limnológicos com qualidade espacial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, E. H.; BONNET, M. P.; ASSIREU, A. T.; STECH, J. L.; NOVO, E. M. L. M.; LORENZZETTI, J. A. On the water thermal response to the passage of cold fronts: initial results for Itumbiara reservoir (Brazil). **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 7, p. 9437-9465, 2010. doi: <10.5194/hessd-7-9437-2010>.

ALCÂNTARA, E. H. ; STECH, J. L.; LORENZZETTI, J. A.; NOVO, E. M. L. M.; ASSIREU, A. T. ; BONNET, M.; CASAMITJANA, X. **On the relationship between heat flux and water surface temperature in a tropical hydroelectric reservoir**. São José dos Campos: INPE, 2009-12-03. (INPE ePrint sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/09.29.19.24). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/09.29.19.24>>. Acesso em: 01 mar. 2010.

ALCÂNTARA, E. H.; STECH, J. L.; NOVO, E. M. L. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; BARBOSA, C. C. Turbidity in the Amazon floodplain assessed through a spatial regression model applied to fraction images derived from MODIS/Terra. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 10, p. 2895-2905, 2008.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. 185 p. (INPE-14056-TDI/1067). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.15.17.12>>. Acesso em: 19 ago. 2011.

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

BRANCO, C. W. C.; KOZLOWSKY-SUZUKI, B.; SOUSA-FILHO, I. F.; GUARINO, A. W. S.; ROCHA, R. J. Impact of climate on the vertical water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. **Lakes & Reservoirs: Research & Management**, v. 14, n. 3, p. 175-191, 2009.

BUKATA, R.P.; JEROME, J.H.; KONDRATYEV, K.Y.; POZDNYAKOV, D.V.; **Optical properties and remote sensing of inland and costal waters**. N.W., EUA, Boca Raton: CRC Press, p.362,1995.

CANNIZZARO, J. P.; CARDER, K. L. Estimating chlorophyll a concentrations from remotesensing reflectance in optically shallow waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 101, p. 13-24, 2006.

CARLILE, D. W. et al. Determination of ecological scale. **Landscape Ecology**, v.2, n.4, p.203-213, 1989.

COSTA, A. P. R.; CANDEIAS, A. L. B. Método de classificação não supervisionada por empilhamento no espaço de atributos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 6845-6852. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.16.00.18>>. Acesso em: 09 abr. 2010.

DAMETTO, G.S.; ROCHA, R.P. 2006: Características climáticas dos sistemas frontais na Cidade de São Paulo. – In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA: A METEOROLOGIA A SERVIÇO DA SOCIEDADE, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2006.

DWYER, J.; SCHMIDT, G. The MODIS reprojection tool. In Qu, J.J.; Gao, W.; Kafatos, M.; Murphy, R.E.; Salomonson, V.V. (Eds.), **Earth science satellite remote sensing**. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. Cap. 13, p. 162-177.

EARTH OBSERVING SYSTEM DATA AND INFORMATION SYSTEM (EOSDIS). **Earth Observing System Clearing House (ECHO) / Warehouse Inventory Search Tool (WIST) Version 10.X** [online application]. Greenbelt, MD: EOSDIS, Goddard Space Flight Center (GSFC) National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2009. Disponível em <<https://wist.echo.nasa.gov/api/>>. Acesso em 18 out. 2010.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **Geoprocessing in ArcGIS**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2004.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência: FINEP, 1988. 575 p., il.

FEDOROVA, N.; CARVALHO, M. H.; SILVA, R. S; **Processos sinóticos em anos la ninã e el niño. parte III: Zona de Convergência do Atlântico Sul**. centro de pesquisas meteorológicas. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS, Brasil. 1999.

FERNANDES, D.; CAMPOS, C. R. J. 2006: Comparações em diferentes períodos de estudo de passagem de sistemas frontais no Brasil. - In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA: A METEOROLOGIA A SERVIÇO DA SOCIEDADE, 14, 2006, Florianópolis. **Anais...**Rio de Janeiro: SBMet, 2006.

FERRARI, G.M.; TASSAN, S. On the accuracy of determining light absorption by "yellow substance" through measurements of induced fluorescence. **Limnol. Oceanogr.** n.36, p.777-786, 1991.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L.G.; SANO, E. E.; SHIMABUKURO, Y. E. Uso do modelo linear de mistura espectral para o mapeamento sistemático e operacional do bioma Cerrado: possibilidades, implicações e procedimentos metodológicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte, MG. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 657-664

FORTUNE, M.; KOUSKY, V.E. Two severe freezes in Brazil: precursors and synoptic evolution. **Monthly Weather Review**, v.111, n.1, p.181-196, 1983.

GARG, V.; JOTHIPRAKASH, V. Estimation of useful life of a reservoir using sediment trap efficiency. **Journal of Spatial Hydrology**, v.8, n.2, p.1-14, 2008.

GIANNINI, M. F. C.; CIOTTI, Á. M.; HARARI, J. Variabilidade espaço-temporal do material em suspensão na Baía de Santos e áreas adjacentes com auxílio de imagens de satélite. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 2033-2039. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.17.28>>. Acesso em: 21 nov. 2010.

GIFFIN, D.; CORBETT, D. R. Evaluation of sediment dynamics in coastal systems via short-lived radioisotopes. **Journal of Marine Systems**. v. 42, p. 83– 96, 2003.

GONÇALVES, M. L.; ANDRADE NETTO, M. L.; JR, J.; COSTA, J. A. F. Classificação Não Supervisionada de Imagens de Sensores Remotos Utilizando Redes Neurais Auto Organizáveis de Métodos De Agrupamentos Hierárquicos. **Revista Brasileira de Cartografia** n. 60 v. 1, 2008. Disponível em: <[http://www.rbc.ufrj.br/\\_pdf\\_60\\_2008/60\\_01\\_3.pdf](http://www.rbc.ufrj.br/_pdf_60_2008/60_01_3.pdf)>. Acessado em 10 nov. 2010.

GORDON, H. R.; CLARK, D. K.; BROWN, J. W.; BROWN, O. B.; EVANS, R. H.; et al. Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. **Applied Optics**, n. 1, v. 22, p. 20 – 36, 1983.

HAFFER, J. Ciclos de tempo e indicadores de tempos na história da Amazônia. **Estud. av., São Paulo**, v. 6, n. 15, Aug. 1992. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40141992000200002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141992000200002&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 18 Ago. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40141992000200002>.

HOGUE, E. F.; WRIGHT, C. W.; SWIFT, R. N. Radiance ratio algorithm wavelengths for remote oceanic chlorophyll determination. **Applied Optics**, v. 26, n. 11, p. 2082–2094, 1987.

IOCCG. **Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex waters**. Dartmouth: 2000. 139 p. (3).

INPE. **Condições climáticas observadas no Brasil em 2009**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2009. Disponível em: [http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/pdf/Sintese\\_Climatica\\_2009.pdf](http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/pdf/Sintese_Climatica_2009.pdf)

ITT - **Visual information solutions professional services group**. ENVI with IDL. Attn: Webmaster, 4990 Pearl East Circle, Boulder, CO 80301, USA. 2009.

KAMPEL, M. **Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através do sensoriamento remoto da cor do oceano e dados *in situ* da costa sudeste brasileira**. 311 p. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) – Instituto Oceanográfico - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2003.

KAMPEL, M.; NOVO, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R.B. (Org) **Oceanografia por Satélites**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, cap. 12, p. 180-196.

KIRK, J.T.O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: University Press, 1994. 509p.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, v. 107, p. 1140-1153, 1979.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

LEITE, M. A. **Variação espacial e temporal da taxa de sedimentação no Reservatório de Salto Grande (Americana – SP) e sua influência sobre as características limnológicas do sistema**. 1998. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - , Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, SP, Brasil.

LEMOS; C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas Frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. **Climanalise Especial** – Edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE/CPTEC. Cap. 14, 1996.

LIMA, I. B. T.; J. L. STECH; MAZZI, E. A.; RAMOS, F. M.; E. M. L. NOVO; LORENZZETTI, J. A.; ROSA, R. R.; BARBOSA, C. C.; OMETTO, J. P.; A. T. ASSIREU. Linking telemetric climatic-limnologic data and online CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> flux dynamics. In: SANTOS, M. A.; ROSA, L. P (Ed.). **Global warming and hydroelectric reservoirs**. Rio de Janeiro: COPPE, 2005. p. 67-69.

LUNETTA, R. S; et al. Measurement of water colour using AVIRIS imagery to assess the potential for an operational monitoring capability in the Pamlico Sound Estuary, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 13, p. 3291–3314, 2009.

MASSAMBANI, O.; AMBRIZZI, T. O CLIMA DA TERRA: **Processos, Mudanças e Impactos**. São Paulo: Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG-USP, 2005. 56p. Disponível em: <[http://www.dca.iag.usp.br/www/material/omassamb/CHO-Poli/aula8\\_ProcFis\\_Tempo.pdf](http://www.dca.iag.usp.br/www/material/omassamb/CHO-Poli/aula8_ProcFis_Tempo.pdf)> Acesso em: 18 agosto 2011.

MATTOS, L. F. **O papel de deformação horizontal na frontogênese na região sul brasileira**. 1987. 118 p. (INPE-4469-TDL/322). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.22.12.57>>. Acesso em: 04 ago. 2011.

MENDONÇA, R. F. **Origem e destino do carbono em sistemas límnicos – uso de técnicas isotópicas em reservatórios e lagos rasos**. 58 p.(Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2007.

MOBLEY, C.D. **Light and water: Radiative transfer in natural waters**. Academic Press. 2004, 593p.

MOLLERI, G. S. F.; NOVO, E. M. L. M.; KAMPEL, M. Caracterização espectral, físico-química e bio-óptica das águas sob a influência do Rio Amazonas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 6587-6594. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15943-PRE/10553). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.11.50>>. Acesso em: 06 maio. 2011.

MORAIS, M. A.; CASTRO, W. A. C.; TUNDISI, J. G. Climatologia de frentes frias sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e sua influência na

limnologia dos reservatórios de abastecimento de água. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 25, n. 2, p 205-217, 2010.

MOTTA, A., G., SANTOS, M. A. F. Domínios de aplicação de plataformas de coletas de dados via satélite – uso oceanográfico. **Revista Marítima Brasileira**. n. 14, v. 23, p.283 - 290, 2001.

MUHAIRI, A. A.; GHEDIRA, H.; AL-AHMAD, H.; DAWOOD, A.; AL-MUALLA, M. Exploring the potential of MODIS visible and thermal channels in monitoring and assessing the impact of desalination plant discharges in the arabian gulf. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE & REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 2009), 2009, Cape Town, South Africa. **Proceedings...** Cape Town: IEEE, 2009.

NASCIMENTO, R. F. F. **Utilização de dados MERIS e *in situ* para a caracterização bio-óptica do reservatório de Itumbiara, GO**. 2010. 113 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.15.18.39-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3769MUL>>. Acesso em: 12 ago. 2011.

NASCIMENTO, R.F.F.; ALCÂNTARA, E.; KAMPEL, M.; STECH, J.L. Caracterização limnológica do reservatório hidrelétrico de Itumbiara, Goiás, Brasil. **Ambiente e Água**, v. 6, n. 2, p. 143-156, 2011.

NOBREGA, I. W. **Spectral analyses applied to the identification of optical active components at Amazon aquatic systems**. 2002. 85 p. (INPE-13059-TDI/1023). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.08.16.41>>. Acesso em: 06 maio. 2011.

NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C.; FREITAS, R. M. Sistemas aquáticos continentais. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Orgs.) **O Sensor MODIS e suas aplicações no Brasil**. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2007. p. 265-275. Cap. 19

NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; FREITAS, R. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; MELACK, J. M.; PEREIRA FILHO, W. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Jpn. J. Limnol.**, v. 7, n. 3, p. 153-161, 2006.

OUILLO, S.; DOUILLET, P.; PETRENKO, A.; NEVEUX, J.; DUPOUY, C.; FROIDEFOND, J. M.; ANDRÉFOUËT, S.; MUÑOZ-CARAVACA, A. Optical algorithms at satellite wavelengths for total suspended matter in tropical coastal waters. **Sensors**, v. 8, n. 7, p. 4165-4185, 2008.

OLIVEIRA, L. L.; VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J. **Meteorologia fundamental**. Erechim: EdiFAPES, 2001. 432 p.

OLIVEIRA, A. S.; NOBRE, C. A. Interações entre sistemas frontais e a convecção na Amazônia. Parte 11: Estudo de casos selecionados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Brasília, 1986. **Anais**.

PAPADIMITRAKIS, Y.; FINDIKAKIS, A. An integrated approach to water quality monitoring in reservoirs, aqueducts and distribution networks of water Supply Systems. **European Water** v. 11, n. 12, p. 27-34, 2005.

PASSERINI, M.D. **Influência das frentes frias nos mecanismos de funcionamento da represa da UHE Carlos Botelho (Lobo/Broa) - Itirapina - SP, nos pontos de vista químico, físico e biológico**. 2010. 111p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, São Carlos, 2010. Disponível em: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=177905](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=177905)> . Acesso em: 9 jun. 2011.

PEREIRA, A.C.F. **Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água associadas às variações espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP. Presidente Prudente, 2008**. 206p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

PEREIRA, J. L. G.; BATISTA, G. T.; THALÊS, M. C.; ROBERTS, D. A. Proporção de componentes derivadas de imagens Landsat TM para caracterização da cobertura da terra na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. (SBSR), 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1495-1504. CD-ROM. ISBN 85-17-00015-3. (INPE-6918-PRE/2882). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.09.09.50> <<http://urlib.net/rep/sid.inpe.br/deise/1999/02.09.09.50?languagebutton=pt-BR>>>. Acesso em: 13 set. 2011.

PETTERSEN, S. **Weather analysis and forecasting**, Vol. I: Motion and motion systems, New York: McGraw Hill Book Co. Inc. 428 pg., 1956

PIWOWAR, J. M.; DEREK, R. P.; LEDREW, E. Temporal mixture analysis of Arctic Sea ice imagery: a new approach for monitoring environmental change. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 63, p.195-207, 1998.

PRIEUR, L.; SATHYENDRANATH, S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of

phytoplankton pigments, CDOM, and other particulate materials. **Limnology and Oceanography**, v. 26, n. 4, p. 671-689, 1981.

PRIMAVESI, O; ARZABE, C; PEDREIRA, M. S. **Mudanças climáticas: visão tropical integrada das causas, dos impactos e de possíveis soluções para ambientes rurais e urbanos. São Carlos**: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007, 200 p (Documento 70). Disponível em: [www.cppse.embrapa.br/servicos/publicacao gratuita/documentos/Odo\\_Mud\\_climaticas\\_2\\_.pdf](http://www.cppse.embrapa.br/servicos/publicacao gratuita/documentos/Odo_Mud_climaticas_2_.pdf). Acesso em 29 de agosto de 2010.

RABELO, E. **Avaliação de técnicas de visualização para mineração de dados**. 2007. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

RASK, M. et al. An introduction to the limnology of the Finnish Integrated Monitoring lakes. **Boreal Env. Res**, v. 1, n. 3, p 263–274, 1998.

REBOUÇAS, A. de C. (Org). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras Editora, 2002.

RODRIGUES, M. L. G; FRANCO, D; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.22, n. 2, p.135-151, 2004.

RODRÍGUEZ-GUZMÁN, V.; F. GILBES-SANTAELLA. Using MODIS 250 m Imagery to Estimate Total Suspended Sediment in a Tropical Open Bay. **International Journal of Systems Applications, Engineering & Development**, v. 3, n. 1, p. 36-44, 2009.

RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrorradiômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2005, 138 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

RUDORFF, N. M. ; KAMPEL, M. ; REZENDE, C. E. Spectral mapping of the Parai ba do Sul River plume (Brazil) using multitemporal Landsat images. **J. Appl. Remote Sens.**, v. 5, p. 053550, 2011.

SATTYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological lower tropospheric frontogenesis in midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. **Mon. Wea. Rev.**, n. 117, 1355-1364, 1989.

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P.L. Tropics - South America. In : **Meteorology of the Southern Hemisphere**, Ed. KAULY,

D. J.; VINCENT, D. G., Meteorological Monograph. American Meteorological Society, Boston, p. 119-139, 1998.

SEPLAN-GO, **Gerência de Estatísticas Socioeconômicas, 2003. Bacias Hidrográficas do Estado de Goiás**. Disponível em: <<http://www.seplan.go.gov.br/sepin/>>. Acesso em: 01 mar. 2010.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. especial, p. 1729-1737, 1998.

SIPELGAS, L.; RAUDSEPP, U.; KÕUTS T. Operatinal monitoring of suspended matter distribution using MODIS Images and numerical modelling. **Marine Systems Institute at TTU, Akadeemia tee**. Tallinn, Estônia, 2004. 21p.

STECH, J.L.S.; ASSIREU, A.T.; SOUZA, A.F.; BARBOSA, C.C.S.; ALCÂNTARA, E.H.; NOVO, E.L.M.E.; LORENZZETTI, J. A.; KAMPEL, M.; FRANCHITO, S. H.; FILHO, W.P. 2007. **Estudo da circulação, qualidade da água e uso/ocupação do solo na bacia hidrográfica do reservatório de Itumbiara. PROJETO DE PESQUISA ENCAMINHADO À FAPESP**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 43,p.

THORNTON, K. W.; KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E. **Reservoir Limnology: Ecological perspectives**. JohnWiley & Sons: New York, 1990.

TUNDISI, JG. et al. Cold fronts and reservoir limnology: an integrated approach towards the ecological dynamics of freshwater ecosystems. **Braz. J. Biol.**, São Carlos, v. 70, n. 3, Oct. 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1519-69842010000400012&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842010000400012&lng=en&nrm=iso)>. Acesso 26 de Agosto de 2011.

TUNDISI J.G.; MATSUMURA-TUNDISI T.; ARANTES JUNIOR J.D.; TUNDISI J.E.M.; MANZINI N.F.I.; DUCROT R. The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical, and biological variables. **Braz. J. Biol.**, v. 64, n. 1, p. 177-186, 2004.

TUNDISI, JG.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; LUZIA, AP.; PASOERINI, MO.; CHIBA, W.; SEBASTIAN, NY. Cold fronts and reservoir limnology: an integrated approach towards the ecological dynamics of freshwater ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, v. 70, p. 815-824, 2010.

VALERIO, A. M.; KAMPEL, M.; STECH, J. L. Correlação de dados de reflectância de sensoriamento remoto estimados com dados do sensor MODIS e medidas *in situ*. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 2011,. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5100-5107.

WETZEL, R. G. **Limnology**: lake and river ecosystems. 3 rd. San Diego: Academic Press, 2001.

ZANATA, L.H.; ESPÍNDOLA, E.L.G. Longitudinal processes in Salto Grande Reservoir (Americana, SP, Brazil) and its influence in the formation of compartment system. **Journal of Biology**. v. 62, n. 2, p. 347-361, 2002.

## APÊNDICE A

```
% load matriz contém a base de dados...
% seguintes variáveis ...

    temperatura(:,1)=data(:,2);

    pressao(:,1)=data(:,3);

    vento(:,1)=data(:,1);

    %%ID=ones*ones(60,60);

% Comparando as colunas ...

    for i=1:length(temperatura)-1

        igualdade(i,1)=temperatura(i,1) - temperatura(i+1,1)>std(temperatura);
        igualdade(i,2)=pressao(i,1) - pressao(i+1,1)<-0.5*std(pressao);
        igualdade(i,3)=abs(vento(i,1) - vento(i+1,1))>std(vento);

        ID(i,:)=igualdade(i,1)+igualdade(i,2)+igualdade(i,3);

        ID(i,:)=ID(i,:)==3;

    end

    igualdade(i,1:60)=longitude_CPUE3(j,1)==X(i,1:60);

    end

end

    for i=1:length(latitude_total)

        igualdade_longitude(i,1)=longitude_CPUE3(j,1)==longitude_total(i,1);

    end

    igualdade(:,j)=igualdade_latitude+igualdade_longitude;

end

    regular(j,1)=lon(j,1);
    regular(j,2)=lat(j,1);
    regular(j,3)=sum(ovos(r(1:size(r)))));
    regular(j,4)=ID(j,1);
    regular(j,5)=0;

end

% Comparando as colunas ...novamente
for j=1:857

for i=(1:size(regular,1)) % tamanho de X -1
```

```

        u(i,:) = regular(j,1:2) == regular(i,1:2);
    end

    w = u(:,1) + u(:,2);

    r = find(w > 1);

    regular(r(2:size(r)), 5) = 1;

    end

    enxuto = find(regular(:,5) == 0);
    grade = regular(enxuto(1:size(enxuto)), :);

    %%%%% Não esquecer que para os mapas teve de somar na longitude e subtrair na latitude de 0.17857142857143 -----

```

Figura A.1 - Rotina desenvolvida no MATLAB para identificação de frentes frias.

## APÊNDICE B

Parametro	Época	Fonte do Dado	Modelo	R2	N
Chl-a	Cheia	Campo	$y = 2.1539x^4 - 5.6292x^3 + 5.259x^2 - 1.4375x + 0.3884$	0.6849	21
Chl-a	Seca	Campo	$y = -3649.8x^4 + 12081x^3 - 14832x^2 + 8001x - 1599.3$	0.5049	14
Turbidez	Cheia	Campo	$y = 21981x^4 - 14488x^3 + 3013.6x^2 - 199.34x + 3.789$	0.6383	19
Turbidez	Seca	Campo	$y = 12.412x^4 - 26.071x^3 + 15.712x^2 - 2.7x + 0.9237$	0.8707	14
Chl-a	Seca/começo enchente	SIMA	$y = -23681x^4 + 66635x^3 - 68748x^2 + 30553x - 4850.8$	0.7462	11
Chl-a	Enchente/cheia	SIMA	$y = 490978x^4 - 1E+06x^3 + 893377x^2 - 320678x + 42571$	0.2832	7
Turbidez	Seca/começo enchente	SIMA	$y = 12.412x^4 - 26.071x^3 + 15.712x^2 - 2.7x + 0.9237$	0.8707	9
Turbidez	Cheia	SIMA	$y = 12016x^4 - 17656x^3 + 389.76x^2 + 3763.9x + 553.08$	0.5214	9

Figura B.1 – Funções polinomiais de quarto grau geradas pela regressão deit entre os dados medidos no campo e os dados orbitais, além das equações têm-se o valor de R<sup>2</sup> e o valor de N.