

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**COMPARTIMENTAÇÃO AQUÁTICA DO  
RESERVATÓRIO RODOLFO COSTA E SILVA-RS, A  
PARTIR DE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS E  
IMAGENS ORBITAIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Flávio Wachholz**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2007**

**COMPARTIMENTAÇÃO AQUÁTICA DO RESERVATÓRIO  
RODOLFO COSTA E SILVA-RS, A PARTIR DE VARIÁVEIS  
LIMNOLÓGICAS E IMAGENS ORBITAIS**

**por**

**Flávio Wachholz**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração em Análise Espacial e Dinâmica Espacial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Geografia.**

**Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2007**

Wachholz, Flávio, 1983-  
W113c  
Compartimentação aquática do reservatório Rodolfo Costa e Silva-RS, a partir de variáveis limnológicas e imagens orbitais / por Flávio Wachholz ; orientador Waterloo Pereira Filho. – Santa Maria, 2007  
97 f. ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Pós-Graduação em Geografia, RS, 2007.

1. Geografia 2. Total de sólidos em suspensão 3. Transparência da água 4. Clorofila 5. Imagens de satélite 6. Monitoramento ambiental I. Pereira Filho, Waterloo, orient.  
II. Título

CDU: 911.2

Ficha catalográfica elaborada por  
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Naturais e Exatas  
Programa de Pós-graduação em Geografia**

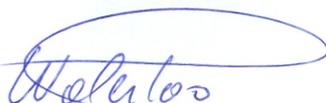
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**COMPARTIMENTAÇÃO AQUÁTICA DO RESERVATÓRIO  
RODOLFO COSTA E SILVA-RS, A PARTIR DE VARIÁVEIS  
LIMNOLÓGICAS E IMAGENS ORBITAIS**

elaborada por  
**Flávio Wachholz**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Geografia**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



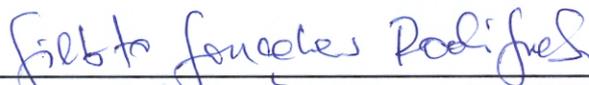
---

**Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Lênio Soares Galvão, Dr. (INPE)**



---

**Gilberto Gonçalves Rodrigues, Dr. (UFRGS)**

Santa Maria, 6 de dezembro de 2007.

*Dedico aos meus pais  
Iria e  
Armando.  
E aos meus irmãos  
Jonas e  
Ricardo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao terminar mais uma etapa - a conclusão da dissertação - é de extrema importância lembrar o apoio recebido das pessoas e instituições, na sua concretização. A essas, cabem meus agradecimentos.

Aos meus pais - Armando Guido Wachholz e Iria Lüdtke Wachholz - em seus ensinamentos de respeito, honestidade, compreensão, amizade e perseverança, pois esses valores foram essenciais para vencer com dignidade mais uma etapa.

Com satisfação agradeço ao professor, orientador e amigo Dr. Waterloo Pereira Filho a oportunidade de sua orientação em mais uma etapa, pelo apoio recebido e suas contribuições científicas.

Aos professores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): Dra Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo e Dr. Flávio Jorge Ponzoni. Grato por suas contribuições científicas.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) a concessão de bolsa de mestrado-sanduiche e custeio de pesquisas, através do Projeto PROCAD nº 258059 “Desenvolvimento de estudos e métodos para análise das características da água no contexto espaço-temporal”.

Ao Programa de Pós-Graduação de Sensoriamento Remoto SERE-INPE, a possibilidade da realização de disciplinas e a disponibilização das imagens orbitais CBERS 2 CCD e Landsat 5 TM.

À Petrobrás Ambiental, por meio do projeto CIPAM (Centro Internacional de Projetos Ambientais) protocolo nº 1230, pelo apoio logístico e institucional oferecido.

À CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), pelo apoio logístico oferecido para as atividades de campo. E ao funcionário João Vargas, o qual esteve sempre pronto às aventuras.

Aos membros do Laboratório de Espectrometria Atômica, por permitirem a realização do Total de Sólidos em Suspensão - TSS. Em especial, a Adriane Medeiros Nunes.

Às pessoas que participaram nas campanhas de campo: Fábio Marcelo Breunig, Daniela Wancura Barbieri, Francisco Monte Alverne de Sales Sampaio, Carline Biasoli Trentin, Gisieli Kramer e Aline Biasoli Trentin. Ainda ao amigo Fábio, por seus conselhos e contribuições científicas.

Ao amigo Msc. Conrado de Moraes Rudorff, pelo apoio técnico com o uso do equipamento FieldSpec e na tabulação dos dados radiométricos.

E, aqui, cabe também agradecer àquelas pessoas que contribuíram indiretamente com sua amizade: Moacir Schmengler, Ernesto Osvaldo Wrasse, Gracieli Trentin, Valdemar Ferreira dos Passos, Carlos Gilberto Konrad, Romario Trentin, Elizabete Weber Reckziegel, Bernadete Weber Reckziegel, Ana Paula d'Lasta.

E não poderia esquecer do Capitão Sartor: colega, amigo e parceiro de atividades.

A todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação.

***Muito Obrigado!!!***

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Geografia  
Universidade Federal de Santa Maria

# COMPARTIMENTAÇÃO AQUÁTICA DO RESERVATÓRIO RODOLFO COSTA E SILVA-RS, A PARTIR DE VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS E IMAGENS ORBITAIS

AUTOR: FLÁVIO WACHHOLZ

ORIENTADOR: WATERLOO PEREIRA FILHO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 6 de dezembro de 2007.

Normalmente, um reservatório apresenta diferentes características ambientais em função das áreas alagadas, dos diferentes padrões de circulação, do tempo de residência e entrada de nutrientes, que definem diferentes compartimentos aquáticos. A caracterização limnológica e espectral, com a identificação da dinâmica dos compartimentos aquáticos, foram realizadas no reservatório Rodolfo Costa e Silva – RS (Brasil). A metodologia baseou-se na coleta de dados de transparência da água medida pelo disco de Secchi, Totais de Sólidos em Suspensão (TSS) e clorofila *a*, *b* e *c* em 21 pontos amostrais, distribuídos em todo o reservatório e obtidos mensalmente para compor um ano hidrológico (Out. 2005 a Set. 2006); com exceção da clorofila, que foi medida em duas datas durante o outono. Imagens dos satélites CBERS 2 CCD e Landsat 5 TM foram utilizadas para relacionar com os dados limnológicos de campo. A distribuição espacial desses dados limnológicos foi identificada por interpolação por média ponderada, para posterior discriminação dos compartimentos aquáticos. A transparência da água apresentou uma variação no ano hidrológico de 100 a 315 *cm* e pode ser dividida em dois períodos: das baixas transparências, compreendendo o período de agosto a novembro (período de preparo de solo para a safra agrícola de verão); e de altas transparências, compreendendo o período de dezembro a junho. Essa variável forma três compartimentos: a) o de montante, com menor transparência; b) o de jusante, com maior transparência; c) junto ao dique, de elevada transparência. O TSS apresentou uma amplitude de 0,17 a 14,16 *mg/L* no ano hidrológico, com comportamento inversamente proporcional ao da transparência definindo compartimentos aquáticos semelhantes. As clorofilas com variação de 0,53 a 24,19 *µg/L* apresentaram os dois compartimentos aquáticos: o de montante e o de jusante. O maior aporte de nutrientes, à montante do reservatório, proporcionaram o desenvolvimento do fitoplâncton (clorofilas). Os resultados obtidos com imagens CCD e TM foram melhores, quando as concentrações de TSS foram maiores e as transparências foram menores, acompanhados de maior variância. As baixas transparências e as concentrações de TSS maiores que 4 *mg/L* permitiram identificar compartimentos aquáticos nas bandas azul (450 nm) e vermelha (661 nm). As clorofilas *a* e *c* apresentaram bandas de absorção nos espectros de reflectância, permitindo estabelecer correlações. Por fim, os compartimentos aquáticos encontrados estão relacionados, principalmente, ao fornecimento de matéria orgânica e inorgânica oriundas do ambiente terrestre para o sistema aquático, verificado no setor montante, e sua concentração diminui no sentido jusante do reservatório.

**Palavras-chave:** TSS, transparência, clorofila, imagens de satélite, monitoramento ambiental.

## ABSTRACT

Master Dissertation  
Program of Post Graduation on Geography  
Federal University of Santa Maria – Brazil

AQUATIC COMPARTMENTS IN RODOLFO COSTA E SILVA (RS-BRAZIL)  
RESERVOIR FROM LIMNOLOGICAL VARIABLES AND ORBITAL IMAGES

AUTHOR: FLÁVIO WACHHOLZ  
ADVISOR: WATERLOO PEREIRA FILHO  
Santa Maria, December 6<sup>th</sup>, 2007

A reservoir presents different environmental traits as a function of the flooded area, water circulation pattern, residence time and nutrients entrance. This situation define the aquatic compartments. The objective was use limnological parameter dynamic and spectral data to identify aquatic compartments in the Rodolfo Costa e Silva reservoir, located on central region of the State of Rio Grande do Sul, on southern region of Brazil. The methodology was based on the measure of water transparence with Secchi disc, Total of Suspended Solids (TSS) and chlorophyll *a*, *b* and *c*. These data were monthly collected in 21 sampling points, distributed over the reservoir during hydrologic year (Oct. 2005 to Sept. 2006). However, chlorophyll samples were collected only two times in autumn season. Satellites images from China-Brazil Earth Resources Satellite 2 (CBERS 2 CCD) and Landsat 5 (TM) were used to make a comparison with limnological and field spectral data. The spatial distribution of limnological parameters was done after data interpolation (weighted average) and its analyses allowed the discrimination of aquatic compartments. During the hydrologic year the transparence changed between 100 and 315 cm and could be divided in two periods: a period with low transparencies, from August to November (marked by land tillage for summer crop) and; period with high transparence, from December to June. Based on this variable, the reservoir presented three compartments: a) upstream, with lower transparence; b) downstream, with higher transparence; c) central region, even with high transparence. The TSS ranged from 0.17 to 14.16 mg/L in the hydrologic year. Its behavior was inversely to the water transparence but presented the same three compartments than transparence. The chlorophyll concentration varied from 0.63 to 24.19 µg/L and defined two compartments: upstream and downstream. A larger input of nutrients in upstream let the development of phytoplankton (chlorophylls). Results from CCD and TM images were better when TSS concentration was greater and transparence smaller, associated to the highest data variance. Concentrations of TSS up to 4 mg/L periods with low transparence allowed identify aquatic compartments with blue band (centered on 450 nm) and the red band (centered on 661 nm). The chlorophylls *a* and *c* showed absorption bands on the field spectrum of reflectance, making possible establish correlations with limnological parameters (TSS and transparence). Finally, the aquatic compartments that were found out are specially related to the entrance of organic and inorganic matter from terrestrial environment. TSS and chlorophyll decreases into downstream.

**Keywords:** TSS, transparence, chlorophyll, satellite images, environmental monitoring.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Localização do reservatório Rodolfo Costa e Silva, nos municípios de Itaara e São Martinho da Serra no Estado do Rio Grande do Sul – Brasil.....	20
Figura 1.2 - Reservatório Rodolfo Costa e Silva e seu entorno .....	22
Figura 2.1 - Comportamento espectral da água, vegetação e solo exposto .....	31
Figura 2.2 - Coeficiente de absorção e de espalhamento da água pura .....	32
Figura 2.3 - Coeficiente de absorção da água e das substâncias presentes na água .....	34
Figura 2.4 - Variação da reflectância da água sob diferentes concentrações de clorofila <i>a</i> .....	37
Figura 2.5 - Relação entre a reflectância e os comprimentos de onda afetados por diferentes concentrações de Totais de Sólidos em Suspensão .....	38
Figura 2.6 - Fator de Reflectância Bidirecional de simulações em laboratório de um corpo d'água com diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida. ....	39
Figura 3.1 - Fluxograma utilizado para o desenvolvimento da pesquisa .....	43
Figura 3.2 - Localização dos compartimentos aquáticos preliminares e dos pontos amostrais .....	44
Figura 3.3 - Processo para a obtenção do TSS. ....	47
Figura 4.1 - Mapa batimétrico do reservatório Rodolfo Costa e Silva – RS, indicação do reservatório antigo e localização dos pontos amostrais.....	56
Figura 4.2 - Variação da profundidade nos pontos amostrais. ....	57
Figura 4.3 - Variação de nível da água do Reservatório durante o ano hidrológico .....	58
Figura 4.4 - Ciclo das macrófitas aquáticas no CAP 3.....	59
Figura 4.5 - Informações espaciais e morfométricas das SBs do reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	60
Figura 4.6 - Mapa de uso da terra nas sub-bacias hidrográficas do reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	61
Figura 4.7 - Usos da terra nas Sub-bacias hidrográficas do reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	62
Figura 4.8 - Índices pluviométricos observados no ano hidrológico estudado, correspondente a 26 e 7 dias anteriores à realização dos trabalhos de campo. ....	63
Figura 4.9 - Variação da transparência nos pontos amostrais em função das coletas do Reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	66
Figura 4.10 - Relação entre as condições atmosféricas e a transparência DS. a) Relação entre a DS e o índice pluviométrico. b) Relação entre a DS e o vento .....	67
Figura 4.11 - Mapas de profundidade do Disco de Secchi em ano hidrológico no reservatório Rodolfo Costa e Silva - RS.....	68

Figura 4.12 - Variação do TSS nos pontos amostrais em função das coletas do Reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	71
Figura 4.13 - Relação entre as condições atmosféricas e o TSS. a) Relação entre o TSS e o índice pluviométrico. b) Relação entre o TSS e o vento.....	71
Figura 4.14 - Mapas de Totais de Sólidos em Suspensão em ano hidrológico no reservatório Rodolfo Costa e Silva - RS.....	73
Figura 4.15 - Mapas de TSS, SOS e SIS no reservatório Rodolfo Costa e Silva - RS.....	74
Figura 4.16. - Variação espacial da concentração de clorofila no reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	76
Figura 4.17 - Espectros de reflectância bidirecional em 9c(16/05/2006).....	77
Figura 4.18 - Relação entre as clorofilas e a razão de bandas. a) Relação entre Chl <i>a</i> e a razão 575 (Pico de reflectância)/675 (Banda de absorção da Chl <i>a</i> ). b) Relação entre Chl <i>c</i> e a razão 575 (Pico de reflectância)/630 (Banda de absorção da Chl <i>c</i> ).....	78
Figura 4.19 - Variação espaço-temporal da reflectância da banda 1 no reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	80
Figura 4.20 - Área dos compartimentos aquáticos da DS em função da reflectância da imagem TM1 para 2c(28/11/2005). .....	81
Figura 4.21 - Relação entre a reflectância TM 1 e a transparência. a) Compartimentos aquáticos (CA1; CA2 e CA3) na 2c(18/11/2005). b) Relação entre transparência e reflectância na 2c(18/11/2005) e 9c(05/05/2006).....	82
Figura 4.22 - Variação espaço-temporal da reflectância da banda 2 no reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	83
Figura 4.23 - Variação espaço-temporal da reflectância da banda 3 no reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	84
Figura 4.24 - Área dos compartimentos aquáticos do TSS em função da reflectância da imagem CCD3 para 4c(06/01/2006). .....	85
Figura 4.25 - Relação entre a reflectância CCD 1 e o TSS. a) Compartimentos aquáticos (CA1; CA2 e CA3) na 4c(06/01/2006). b) Relação entre TSS e a reflectância na 1c(20/10/2005) e 11c(07/07/2006). .....	86
Figura 4.26 - Média da concentração de TSS e transparência do DS durante o ano hidrológico e suas curvas de tendência.....	87
Figura 4.27 - Condicionantes da compartimentação aquática do reservatório Rodolfo Costa e Silva.....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Características do reservatório Rodolfo Costa e Silva .....	19
Tabela 2.1 - Bandas de absorção dos pigmentos fotossintetizadores .....	36
Tabela 2.2 - Características dos sensores CBERS 2 CCD e Landsat 5 TM.....	41
Tabela 3.1 - Saídas de campo e os dados coletados .....	45
Tabela 3.2 - Imagens orbitais utilizadas na compartimentação aquática .....	52
Tabela 4.1 - Estatísticas descritivas dos dados de vento a 10 metros da superfície (km/h) .....	64
Tabela 4.2 - Estatísticas descritivas dos dados da profundidade do disco de Secchi .....	65
Tabela 4.3 - Estatísticas descritivas dos dados de Totais de Sólidos em Suspensão.....	70
Tabela 4.4 - Estatísticas descritivas dos dados do TSS, SOS e SIS .....	72
Tabela 4.5 - Estatísticas descritivas dos dados das Chl <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i> .....	75
Tabela 4.6 - Síntese dos compartimentos aquáticos encontrados no ano hidrológico .....	87

## LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

$\theta$  = Ângulo zenital do sol

$a_d$  = componentes dissolvidos

$a_p$  = detritos particulados

$F_p$  = Fator de perda

$R_{\acute{a}gua}(\lambda)$  = Fator de reflectância bidirecional da água

$m^2$  = Metros ao quadrado

$P_{cal}$  = Peso de Calcinação

$P_f$  = Peso Final

$P_i$  = Peso Inicial

$L_w$  = radiância da água

$L_{\acute{a}gua}(\lambda)$  = valor da radiância medido sobre a água

$\Sigma(R,C,T)$  = Somatório dos comprimentos das ravinas (R), canais (C) e tributários (T) em km

$\Sigma CN$  = somatório do comprimento das curvas de nível

$\Delta h$  = equidistância entre curvas de nível

$a_a$  = coeficiente de absorção da água

$a_t$  = coeficiente de absorção total

$R_{placa}(\lambda)$  = fator da reflectância bidirecional das placas de referência

$a_c$  = organismos clorofilados

$L_w'$  = Radiância da água medida pelo sensor após a correção atmosférica

$L_{placa}(\lambda)$  = valor da radiância medido sobre a placa de referência

$V$  = Volume (L)

$^{\circ}C$  = Graus centígrados

$\mu m$  = micrômetro

5S = Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

6S = Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum

$A$  = Área da SB (ha)

$a$  = Coeficiente de absorção

$b$  = coeficiente de espalhamento

c = Coleta  
CA = Compartimento Aquático  
CAP = Compartimento Aquático Preliminar  
CBERS = China Brazil Earth Resources Satellite  
CCD = Charge-Coupled Device  
CE = Condutividade Elétrica  
Chl = clorofila  
CIPAM = Centro Internacional de Projetos Ambientais  
COAs = Componentes Opticamente Ativos  
COD = Carbono Orgânico Dissolvido  
CONAMA = Comissão Nacional do Meio Ambiente  
CORSAN = Companhia Riograndense de Saneamento  
D = Densidade da rede de drenagem (km/ha)  
DNOS = Departamento Nacional de Obras e Saneamento  
DS = Transparência do Disco de Secchi  
e.g. = exempli gratia  
EC = Espectrorradiometria de Campo  
FRB = Fator de Reflectância Bidirecional  
GPS = Global Positioning System  
Green = banda verde  
H= declividade média da SB  
ha = hectares  
hm = hectômetro  
IIE = Instituto Internacional de Ecologia  
INPE = Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IVP = Infravermelho Próximo  
Km<sup>2</sup> = Quilômetros ao quadrado  
L = Litro  
LANDSAT = Land Satellite  
LEGal = Linguagem Espaço-Algébica  
m = metros  
mg = Miligramas  
MIR = Infravermelho Médio  
mm = milímetros de precipitação pluviométrica

MNT = Modelo Numérico do Terreno

MODIS = Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

N = Número de amostras

NASA = National Aeronautics and Space Administration

NDWI = Índice de Diferença Normalizada da Água

NIR = IVP

*nm* = nanômetro

OES = Observatório Espacial do Sul

P = Ponto Amostral

PCD = Plataforma de Coleta de Dados

PT = Profundidade total

r = Coeficiente de correlação

$R^2$  = Coeficiente de determinação

REM = Radiação Eletromagnética

RN = coeficiente de rugosidade

RS = Rio Grande do Sul

Sig = Significância

SIS = Sólidos Inorgânicos em Suspensão

SOS = Sólidos Orgânicos em Suspensão

SPRING = Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas

SURCEN = Superintendência Central

TM = Thematic Mapper

TSS = Total de Sólidos em Suspensão

UTM = Projeção Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b> .....	17
1. – INTRODUÇÃO.....	17
1.1 – Características gerais da Área em Estudo.....	19
1.2 - Organização da dissertação .....	22
<b>CAPÍTULO II</b> .....	23
2. – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	23
2.1 - Compartimentos Aquáticos .....	23
2.1.2 - Transparência da água.....	25
2.1.3 - Totais de Sólidos em Suspensão - TSS .....	26
2.1.4 - Macrófitas Aquáticas .....	26
2.1.5 - Fitoplâncton.....	27
2.1.6 - Carbono Orgânico .....	28
2.1.7 - Radiação e ambientes aquáticos.....	29
2.2 – Constituintes opticamente ativos da água.....	31
2.2.1. Pigmentos fotossintetizantes .....	35
2.2.2. Partículas em suspensão .....	37
2.2.3. Substâncias orgânicas dissolvidas .....	38
2.3 Imagens orbitais multiespectrais .....	40
2.4.- Correção atmosférica .....	41
<b>CAPÍTULO III</b> .....	43
3. – METODOLOGIA.....	43
3.1 - Trabalhos de campo e medidas limnológicas.....	45
3.1.1 - Transparência do disco de Secchi .....	46
3.1.2 - Total de Sólidos em Suspensão.....	46
3.1.2.1 - Total de Sólidos Orgânicos e Inorgânicos em Suspensão.....	48
3.1.3 - Clorofila .....	48
3.1.4 - Espectrorradiometria de campo.....	49
3.1.5 - Profundidade total .....	49
3.1.6 - Condições Atmosféricas.....	50

3.2.- Construção do Banco de Dados Georreferenciados.....	50
3.2.1.- Processamento das imagens de satélite.....	51
3.2.1.1 - Correção atmosférica e conversão para reflectância.....	52
3.2.1.2 - Delimitação do reservatório nas imagens.....	53
3.2.2 - Modelo Numérico do Terreno.....	53
3.2.3 - Integração dos dados.....	54
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>55</b>
<b>4. – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>55</b>
4.1 - Características do reservatório e o ano hidrológico.....	55
4.1.1 - Macrófitas aquáticas.....	58
4.1.2 - Entorno do reservatório.....	59
4.1.3 - Condições atmosféricas.....	63
4.2 – Características limnológicas do reservatório.....	64
4.2.1 - Transparência do disco de Secchi.....	65
4.2.2 - Totais de Sólidos em Suspensão.....	69
4.2.3 - Clorofila <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i> .....	74
4.2.4 - Dados radiométricos.....	76
4.3 - Compartimentos aquáticos encontrados nas imagens de sensoriamento remoto.....	79
4.4 – Síntese dos compartimentos aquáticos.....	86
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>90</b>
<b>5. – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>90</b>
5.1 - Sugestões e recomendações.....	91
<b>6. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>92</b>

*“El agua suena cuando hay silencio,  
Se escucha cuando hay paz,  
Se ve cuando hay luz,  
Se siente cuando hay sentimiento.  
Y se bebe cuando se tiene sed.”*

Henrique Romanos

---

### 1. – INTRODUÇÃO

Nos primórdios da colonização do Estado do Rio Grande do Sul, os povos utilizavam principalmente a água dos grandes rios (e. g., rio Jacuí e rio Uruguai), lagos (e. g., Lago Guaíba) e lagunas (e. g., Laguna dos Patos) para o consumo e navegação. Com o tempo, os povoamentos ampliaram-se, formando vilas e cidades. A necessidade de água era iminente, tanto para abastecimento urbano quanto à geração de hidroeletricidade. Assim, mais tarde, na agricultura, com a introdução do cultivo do arroz, necessitou-se de um volume hídrico cada vez maior, provocando a construção de açudes.

O governo do Estado do Rio Grande do Sul, através da CORSAN, tem construído reservatórios para abastecimento, principalmente para médios e grandes centros urbanos. A exemplo, pode-se destacar o reservatório Rodolfo Costa e Silva, que é uma das fontes de água usadas para abastecer a cidade de Santa Maria, no centro do estado. A qualidade da água do reservatório tem implicações diretas no processo de tratamento e no custo da água (Babbitt et al., 1973; Richter e Azevedo Netto, 1998). Esse reservatório apresenta a bacia hidrográfica ocupada por áreas agrícolas e pastoris, as quais têm potencial de disponibilizar uma grande quantidade de nutrientes para o sistema aquático.

No entanto, a construção de reservatórios de água modifica as condições naturais de uma determinada secção do rio, como o ritmo e a vazão do rio, formando ambientes lênticos com distinção do comportamento das propriedades limnológicas (Branco e Rocha, 1977; Kimmel et al., 1990; Esteves, 1998; Tundisi et al., 1999). Além disso, localmente, a formação de reservatórios apresenta influência no clima, na geomorfologia e na ecologia, alterando a fauna e a flora presentes no ambiente aquático e terrestre.

As perturbações naturais e humanas que ocorrem em uma bacia hidrográfica influenciam nas condições ambientais de um reservatório. Trabalhos realizados por Pereira Filho (2000), Alberti (2001, 2004), Wachholz (2004), Strassburguer (2005) confirmaram a dependência do sistema aquático em relação ao ambiente terrestre. Souza (2001) identificou que a dinâmica do uso da terra está relacionada à destruição ou à substituição da cobertura vegetal original, e esta modifica as características físicas e químicas das águas superficiais dos reservatórios do rio Vacacaí-Mirim (DNOS) e do Ibicuí-Mirim (Rodolfo Costa e Silva), localizados no centro do Estado do Rio Grande do Sul.

O sensoriamento remoto tem contribuído na realização de estudos de ambientes aquáticos, ajudando a entender as complexidades de um ecossistema e suas interações. 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, 2006).

A água possui componentes opticamente ativos, especialmente o TSS e a clorofila, que influenciam no espectro de reflectância. Estudos realizados por Galvão e Pereira Filho (1997) encontraram correlação entre o TSS e a reflectância das bandas do visível, em imagens TM LANDSAT 5 no Reservatório de Passo Real – RS. Nellis et al. (1998) estimou classes de níveis de concentração de sólidos em suspensão, utilizando imagens TM LANDSAT 5. Novo (2005) caracterizou a dinâmica da distribuição espacial do fitoplâncton e da matéria inorgânica, através de um trabalho realizado em escala temporal no Lago Curuai – localizado na planície Amazônica –, utilizando imagens Modis/Terra.

Atualmente, com a necessidade das empresas (públicas e privadas) de abastecimento de água fornecer a discriminação da qualidade da água na conta mensal, volta-se a preocupação com o tratamento e com a conservação dos mananciais com o intuito de diminuir custos financeiros no tratamento da água. Nesse sentido, o reservatório Rodolfo Costa e Silva encontra-se em um momento favorável em função da instalação do projeto CIPAM e da preocupação da CORSAN com a preservação da água do mesmo.

Estudo realizado por Breunig (2006) relacionou as variáveis limnológicas e os dados espectrais do reservatório Rodolfo Costa e Silva. A menor transparência foi encontrada no setor montante do reservatório e o TSS apresentou-se inversamente proporcional. A partir desse estudo, o autor sugestionou a verificação temporal das variáveis limnológicas e sua resposta espectral em imagens orbitais para ajudar a entender a dinâmica do reservatório.

Uma vez conhecido o comportamento dos parâmetros limnológicos de um reservatório, poderá ser diminuído o número de parâmetros para análise e reduzida a

densidade de amostras em estudos futuros (Margalef, 1983). Nesse contexto, as imagens orbitais podem ser utilizadas para o monitoramento ambiental contínuo do sistema aquático.

Dessa forma, o trabalho teve como objetivo realizar uma possível compartimentação aquática espaço-temporal do reservatório Rodolfo Costa e Silva. Os objetivos específicos foram:

- Analisar as características limnológicas Totais de Sólidos em Suspensão (TSS), Sólidos Inorgânicos em Suspensão (SIS), Sólidos Orgânicos em Suspensão (SOS), Transparência do disco de Secchi (DS), clorofila *a*, *b* e *c* no contexto espaço-temporal, no reservatório Rodolfo Costa e Silva;
- Identificar compartimentos aquáticos no reservatório, utilizando imagens de sensoriamento remoto;
- Relacionar os compartimentos aquáticos das variáveis limnológicas com os compartimentos encontrados nas imagens orbitais.

### 1.1 – Características gerais da Área em Estudo

O reservatório Rodolfo Costa e Silva da CORSAN tem área atual de 275 hectares e está localizado no limite dos municípios de Itaara e São Martinho da Serra, no centro do Estado do Rio Grande do Sul. Na Tabela 1, são apresentados parâmetros adicionais do reservatório. A Figura 1.1 mostra a localização da área de estudo. O reservatório está localizado entre as coordenadas geográficas: 29° 29' 01" a 29° 30' 56" de Latitude Sul e 53° 43' 32" a 53° 45' 29" de Longitude Oeste.

Tabela 1.1 - Características do reservatório Rodolfo Costa e Silva

Dados	Descrição
Nome	Barragem Rodolfo Costa e Silva
Municípios	Itaara e São Martinho da Serra
Curso D'água barrado	Rio Ibicuí-Mirim
Área da Bacia hidrográfica	49,4 km <sup>2</sup>
Área da Bacia Hidráulica	275 ha
Volume útil	24.900.000 m <sup>3</sup>
Vazão Média	1,23 m <sup>3</sup> /s
Altura no dique em relação ao rio	34 m
Altitude máxima de água	468,62 m

Fonte: CORSAN, 2007.

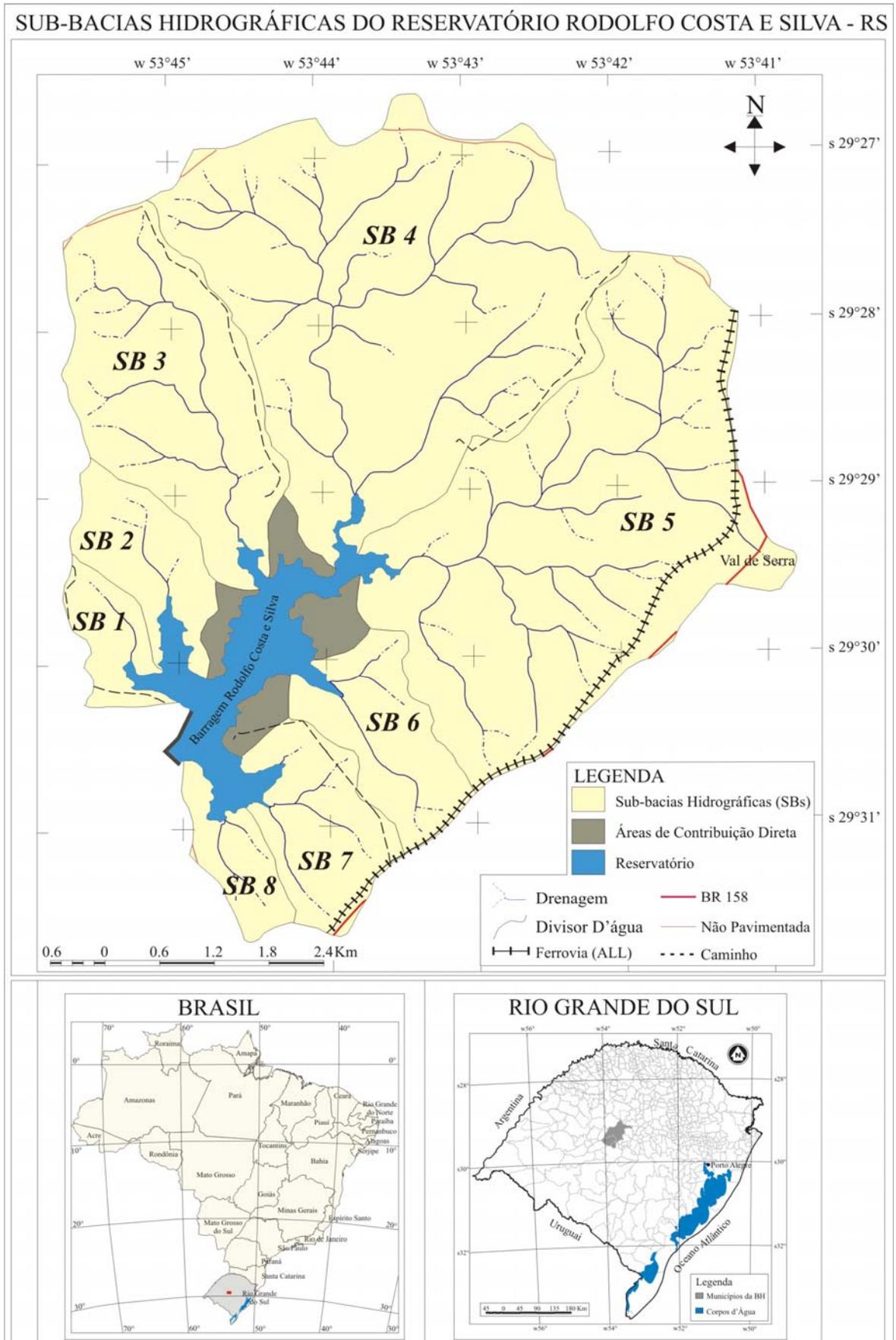


Figura 1.1 - Localização do reservatório Rodolfo Costa e Silva, nos municípios de Itaara e São Martinho da Serra no Estado do Rio Grande do Sul – Brasil

O reservatório está inserido na área de influência do clima subtropical, com temperatura média anual de 22°C, sendo que as temperaturas máximas são superiores a 30°C e ocorrem no verão; as mínimas são inferiores a 5°C e ocorrem nos meses de inverno (Sartori, 1979). As precipitações são regulares e de origem frontal, com a possibilidade de estiagens ocasionais em qualquer período do ano, porém o mês menos chuvoso é novembro, e os meses mais chuvosos são junho, setembro e outubro (Sartori, 2000).

O reservatório Rodolfo Costa e Silva é compreendido pelo setor de alto curso da bacia hidrográfica do rio Ibicuí-Mirim. A jusante deste encontra-se o Reservatório Saturnino de Brito, que também compõe o sistema de abastecimento da CORSAN. Esses, juntos com o reservatório DNOS, abastecem a população da área urbana de Santa Maria. No entanto, o reservatório Rodolfo Costa e Silva abastece em mais de 60% a cidade.

A bacia hidrográfica do Ibicuí Mirim está situada, geologicamente, em uma área de rochas compostas, unicamente, pela Seqüência Superior da Formação Serra Geral, formada por basaltos e fenobasaltos. Essas rochas são de composição ácida e, normalmente, revestem as rochas efusivas básicas, constituídas por riólitos feltsíticos, dacitos feltsíticos, riódacitos feltsíticos e seus componentes vítreos (FIBGE, 1986).

As características geológicas se refletem na ocorrência do solo podzólico Bruno acizentado álico. Esse solo é normalmente ácido, de textura argilosa, com horizonte A de moderado a profundo, o que sugere boa resistência aos processos erosivos superficiais. As altitudes na bacia hidrográfica estão entre 411 a 516 metros, e a declividade média está entre 8 a 12% (Souza, 2001). Essas condições estabelecem um relevo ondulado, caracterizado pelas colinas.

A cobertura terrestre predominante na área de captação do reservatório Rodolfo Costa e Silva é agrícola, com áreas de campo destinadas à pastagem e a pequenas áreas de vegetação arbórea, especialmente de matas ciliares (Figura 1.2). As principais culturas agrícolas praticadas na área são: soja, trigo e milho. Nas áreas de campo, é praticada a pecuária em regime extensivo, sendo principalmente presente na margem direita do reservatório. As áreas florestais concentram-se junto à rede de drenagem, considerada muito importante à manutenção da fauna aquática.

A ocupação humana é maior nos divisores da bacia hidrográfica que no entorno do reservatório. A localização das residências encontra-se, geralmente, em adjacência às rodovias, facilitando a locomoção da população a outras áreas. Por outro lado, em áreas próximas ao reservatório, são desenvolvidas a agricultura e a pecuária.



Figura 1.2 - Reservatório Rodolfo Costa e Silva e seu entorno

## 1.2 - Organização da dissertação

Além deste primeiro capítulo, que se refere à introdução ao trabalho, com os aspectos inerentes à relevância destes estudos, os objetivos propostos e as características do reservatório Rodolfo Costa e Silva, são apresentados ainda mais quatro capítulos. No Capítulo II apresenta-se a fundamentação teórica. São abordados tópicos referentes à limnologia, do sensoriamento remoto, além da integração dessas informações mostrando a aplicação do sensoriamento remoto em sistemas aquáticos. O Capítulo III trata da metodologia utilizada. Nessa parte, são descritas as etapas que foram tomadas para a obtenção dos resultados. No Capítulo IV, são apresentados os resultados obtidos. Os resultados indicam as análises referentes aos dados de campo e dados de sensoriamento remoto. Por fim, no Capítulo V, são apresentadas as considerações finais e as sugestões.

*“A maioria das idéias fundamentais da ciência são essencialmente sensíveis e, regra geral, podem ser expressas em linguagem compreensível a todos.”*

**Albert Einstein**

---

## 2. – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sensoriamento remoto permite adquirir informações sobre a superfície terrestre, a partir da detecção e registro da energia radiante resultante da interação da energia eletromagnética e do objeto (Curran, 1986). Essa técnica pode ser definida como a amostragem do espectro eletromagnético (Galvão, 2001). O dado coletado é ambiental, pois são resultantes de componentes bióticos e abióticos em uma dada área e momento (Novo, 1988).

Os dados de sensoriamento remoto são utilizados, principalmente, na avaliação de recursos naturais (e.g., geologia, vegetação, solo). Estudos relacionados à água são mais recentes e estão se ampliando, em função do aprimoramento dos sensores remotos, quanto às suas resoluções: radiométrica, espectral, espacial e temporal. Entre as variáveis limnológicas passíveis de serem estudadas com o uso de sensoriamento remoto, estão os Totais de Sólidos em Suspensão, a matéria orgânica e inorgânica dissolvida e os pigmentos fotossintetizantes.

As bases teóricas referentes às variáveis limnológicas e aos recursos da tecnologia de sensoriamento remoto são apresentadas com a perspectiva de entender a espacialidade e a dinâmica de um reservatório. O papel das geotecnologias, nesse contexto, permite o processamento digital de imagens de satélite, a análise espacial dos dados limnológicos e, com isso, a identificação de diferentes padrões de água, ou seja, de compartimentos aquáticos.

### 2.1 - Compartimentos Aquáticos

Compartimentos aquáticos são áreas específicas envolvendo condições ambientais similares em um reservatório (Pereira Filho e Novo, 2002). Os reservatórios apresentam uma

compartimentação horizontal em unidades e subunidades representadas pelos braços dos afluentes com diferentes padrões de circulação e tempo de residência da água. Além disso, três regiões são encontradas em reservatório – lótica, transição e lântica – distinguindo-se pelo funcionamento hidráulico, transporte de sedimento, penetração da luz e pelas características da comunidade planctônica e bentônica (Tundisi, 1986).

Um reservatório pode ter vários compartimentos aquáticos com uma ou mais características em comum, porém comunicando-se um(s) com outro(s) e deslocando energia e matéria, ou seja, ocorre uma transferência das propriedades da água (Angelini, 2002). Essa transferência de propriedades direciona mudanças no tempo e no espaço. A disponibilidade de nutrientes, em uma dada área, pode estar vulnerável a condições de iluminação e às sucessivas mudanças direcionais de vento, que, conforme o período, poderá formar um ou vários compartimentos aquáticos.

As propriedades limnológicas podem ser utilizadas na definição de compartimentos aquáticos, por compreender os processos físicos, químicos e biológicos em reservatórios. Esteves (1998) destaca os estudos de Forel em relação a lagos, em que: “lago é um mundo em escala pequena no qual o ciclo da integração e da dissolução sempre se repete” ou ainda “cada lago é um órgão da terra”. Esses estudos destacam a individualidade, ciclicidade e dinâmica de um ambiente aquático.

O ecossistema aquático compreende dois sistemas: biótico o abiótico, sendo esses vulneráveis à entrada e saída do ecossistema terrestre. Por isso, o ambiente aquático é um sistema aberto, com grande influência das características do ambiente terrestre e, portanto, da ação humana. Assim, a principal entrada no ecossistema aquático são as chuvas, quanto a recepção direta *in situ* e indireta, através do escoamento superficial na bacia hidrográfica. Essa fonte é a principal responsável por mudanças no sistema aquático, pois, além das características da própria água, ocorre a interação com o ambiente terrestre.

A construção de reservatórios impõe novas características espaço-temporais no ambiente. Os principais impactos relacionados são: o aumento da taxa de sedimentação na confluência com seus afluentes, a inundação de áreas florestais e agrícolas, causando alterações físicas e químicas no meio aquático e modificações substanciais na fauna e na flora silvestre (Esteves, 1998). Essas mudanças implicam uma maior disponibilidade de nutrientes no sistema aquático com a proliferação de algas e com o crescimento de macrófitas aquáticas.

O metabolismo do ecossistema aquático em um reservatório envolve três etapas: produção, consumo e decomposição (Esteves, 1998). A produção de um ecossistema aquático é realizada por todos os organismos capazes de sintetizar matéria orgânica, a partir de gás

carbônico, sais minerais e energia solar. Esses organismos são chamados de produtores primários e em sua maioria vivem na zona eufótica (iluminada) do lago, como algas, zooplânctons e bactérias. A disponibilidade de luz, no ecossistema aquático, influencia no desenvolvimento desses microorganismos (Pereira Filho, 2000).

A conservação dos ecossistemas aquáticos continentais, prevendo a utilização racional com o controle da qualidade e quantidade da água, é uma das preocupações centrais da limnologia atual (Esteves, 1998). Esses ecossistemas podem apresentar áreas vulneráveis à deterioração e, se identificadas, facilitam o seu monitoramento.

A disponibilidade de nutrientes pode ser indicada pelo seu estado trófico. Para isso, os parâmetros limnológicos mais utilizados são: o fósforo, a clorofila *a* e a transparência (Dekker, 1993; Mota, 1997).

### **2.1.2 - Transparência da água**

A transparência é avaliada com o uso do disco de Secchi, a partir da indicação da profundidade de seu desaparecimento (CETESB, 1987; Esteves, 1998). Quanto maior a transparência da água, menor dispersão do campo da luz e maior a medida de profundidade do disco de Secchi. Em outra perspectiva, o valor do disco de Secchi é inversamente proporcional à quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos no percurso da luz e ao coeficiente de atenuação da irradiância (Kirk, 1994; Esteves, 1998).

A transparência da água do disco de Secchi varia bastante entre os ecossistemas aquáticos e, num mesmo lago, pode variar ao longo do dia, estando na dependência do regime de circulação da massa de água (influência do vento), da natureza geoquímica da bacia e do regime das chuvas (Pômpeo, 1999). Assim, há lagos com apenas alguns centímetros de transparência e outros com até dezenas de metros.

O desaparecimento do disco de Secchi corresponde à profundidade na qual a radiação da faixa do visível não é mais sensível ao olho humano. Superfícies de água limpa apresentam uma dispersão muito reduzida e profundidade Secchi mais elevada que em águas com elevada turbidez. A zona fótica pode ser estimada através da transparência do disco de Secchi conforme a equação 2.1 (Ishii, 1987, citado em Esteves, 1998). O desaparecimento do disco de Secchi corresponde a 10% da radiação superficial. O limite inferior da zona eufótica recebe apenas 1% da irradiância daquela recebida na superfície e, abaixo dessa é denominada de zona afótica (Kirk, 1994).

$$ZF = 3 \times DS \quad (2.1)$$

Onde:  $ZF$  é a Zona Fótica;  $DS$  é a profundidade Secchi em metros.

### 2.1.3 - Totais de Sólidos em Suspensão - TSS

O TSS compreende os sólidos orgânicos em suspensão e sólidos inorgânicos em suspensão transportados pela água com um diâmetro maior que  $0,45 \mu m$  (Todeschini, 2004). A fração orgânica é representada principalmente pelo fitoplâncton, zooplâncton e substâncias húmicas. A fração inorgânica é constituída principalmente de silte e argila (Esteves, 1998). A constituição do TSS é dada pela equação 2.2.

$$TSS = SOS + SIS \quad (2.2)$$

Onde:  $TSS$  é o Totais de Sólidos em Suspensão;  $SOS$  é o Sólidos Orgânicos em Suspensão; e  $SIS$  é o Sólidos Inorgânicos em Suspensão.

O TSS é resultado das atividades do metabolismo aquático e tem relação com as atividades desenvolvidas no ambiente terrestre. Partículas orgânicas e inorgânicas são carregadas, através do escoamento superficial, nas sub-bacias hidrográficas até o reservatório. Entretanto, a perda de material varia em função do tipo do uso da terra. Por exemplo, áreas florestais disponibilizam uma menor quantidade de partículas para o sistema aquático que áreas agrícolas.

O TSS em níveis elevados pode repercutir na degradação do habitat aquático e da qualidade da água (Ambers, 2001). Entre os problemas observados, está a maior disponibilidade de sólidos vulneráveis à deposição e seu potencial assoreamento de rios e reservatórios.

Contudo, a formação de um ambiente lântico modifica a espacialidade na deposição de sedimentos (Carvalho, 2000). A modificação se desencadeia desde o remanso, com a deposição de cascalhos e areias. As substâncias mais finas são depositadas mais adentro do reservatório. Essas partículas têm uma acentuada participação no TSS em um reservatório, e a sua deposição pode diminuir o valor dessa variável limnológica.

### 2.1.4 - Macrófitas Aquáticas

As macrófitas aquáticas são as principais comunidades produtoras de biomassa em um

sistema aquático. Durante a sua fase evolutiva, retornaram do ambiente terrestre para o aquático, sendo que a maioria das espécies consegue adaptar-se em qualquer corpo aquático (Esteves, 1998).

As macrófitas aquáticas podem ser divididas em quatro grupos ecológicos: as emersas, com folhas flutuantes, submersas enraizadas, submersas livres e as flutuantes (Esteves, 1998). A ocorrência de uma espécie é condicionada pelos seguintes fatores: proximidade litorânea, profundidade, disponibilidade de nutrientes, turbidez da água e vento.

Esteves (1998) descreve o desenvolvimento das macrófitas aquáticas ao longo do ano. Na primavera, inicia a formação de brotos, em seqüência do intenso desenvolvimento das folhas, quando são registrados os maiores valores de produtividade primária. No verão, diminui a produtividade, mas são registrados os maiores valores de biomassa, no final da estação, ocorre a formação de detritos, a partir da decomposição das folhas. No outono, de forma pouco intensa, ocorre a respiração e a produtividade.

No Brasil, o crescimento e a mortalidade de macrófitas aquáticas estão relacionados ao nível da água de um reservatório (Pômpeo, 1999). Essa mudança de nível está condicionada a períodos de maior uso da água (verão) e à ocorrência de estiagens.

As macrófitas aquáticas atenuam a entrada de energia na coluna da água e, em conseqüência, dificultam a proliferação do fitoplâncton (Esteves, 1998). Também, as menores trocas de energia diminuem a taxa de oxigênio na água. Por outro lado, as comunidades zooplantônicas apresentam pouco efeito da atenuação proporcionada pelas macrófitas, pois não apresentam atividade fotossintética.

### **2.1.5 - Fitoplâncton**

O fitoplâncton é caracterizado pelas comunidades de vegetais microscópicos que vivem em ambientes aquáticos, distribuídos em diversas camadas de água, e constitui-se como membro responsável pela produção primária (CETESB, 1987). Em águas continentais, o fitoplâncton está representado pelas algas, sendo os principais grupos: Cyanophyta, Chlorophyta, Euglenophyta, Chrysophyta e Pyrrophyta.

A floração de algas ocorre na primavera e perdura até esgotarem os principais nutrientes na zona eufótica (Esteves, 1998). A interrupção da floração das diatomáceas significa a entrada em uma nova fase de “águas limpas”, ou seja, é o período de maior transparência da água. O verão dificulta o crescimento de algas, pois nesse momento o

ambiente aquático encontra-se estratificado, prejudicando a circulação dos nutrientes. Este processo ocorre até o final do outono. As menores temperaturas no inverno dificultam o crescimento de algas.

A espacialização, tanto vertical como horizontal do fitoplâncton, depende da densidade específica dos organismos, da composição química do meio, da turbulência da água, do tempo de residência da água, da radiação solar e da temperatura da água. Portanto, a quantidade de nutrientes e a disponibilidade de luz na coluna da água são fundamentais para o desenvolvimento de fitoplâncton. Com a perda, por exemplo, de fertilizantes para o sistema aquático pode ocorrer a proliferação excessiva de algas e isso provocar mudanças de sabor, odor, turbidez, cor e aumento da matéria orgânica (Mota, 1997).

### **2.1.6 - Carbono Orgânico**

O carbono orgânico, em ecossistemas aquáticos, pode ser agrupado em duas categorias: carbono orgânico detrital e carbono orgânico particulado da biota. O carbono detrital é dividido em duas frações: carbono orgânico dissolvido, mais comum, e carbono orgânico particulado detrital. O carbono orgânico dissolvido (COD) origina-se da decomposição das plantas e animais e a partir da excreção desses organismos. Os principais componentes são: proteínas, carboidratos, lipídios e compostos húmicos. A concentração de COD é aproximadamente 10 vezes superior a do carbono orgânico particulado detrital (Esteves, 1998).

O nível de excreção de matéria orgânica pelo fitoplâncton e pelas macrófitas aquáticas depende do estado fenológico e fisiológico desses. Em condições eutróficas de um lago, ocorre uma menor taxa de excreção de COD. A macrófita aquática, por exemplo, a *Utricularia breviscapa*, obtém o valor médio de excreção anual de 1,3% da produção total (Menezes, 1984 citado em Esteves, 1998). As fezes da comunidade zooplanctônica também é uma fonte importante de COD.

O COD desempenha o papel de fonte de energia para os organismos aquáticos, interfere na absorção de radiação ao longo da coluna da água e age como complexador de metais pesados, em que estes ficam depositados no fundo (Esteves, 1998).

O COD apresenta dois tipos de substâncias, classificadas em: húmicas e não-húmicas. As substâncias húmicas constituem a maior fração de COD em ambientes aquáticos continentais. A sua origem está associada à comunidade fitoplanctônica e às macrófitas

aquáticas, mas, em muitas situações, o material advindo do ambiente terrestre, através da erosão, representa a maior fração de COD húmico. As substâncias não-húmicas são formadas por compostos nitrogenados, carboidratos solúveis, lipídios, vitaminas e enzimas. Estas podem ter origem autóctone caracterizada por bactérias, fitoplânctons e por material em suspensão de gênese alóctone (Esteves, 1998).

### 2.1.7 - Radiação e ambientes aquáticos

O sol é a principal fonte de energia para a superfície terrestre, sendo constituído por ondas eletromagnéticas que se propagam na mesma velocidade da luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ), mas se diferenciando no comprimento de onda (Esteves, 1998). Os comprimentos de onda de maior interesse ecológico abrangem as faixas do ultravioleta, do visível e do infravermelho. O olho humano apresenta sensibilidade na faixa do visível do espectro. Essa faixa é fundamental para as plantas, pois é denominada de radiação fotossinteticamente ativa, por ser a parte da radiação total absorvida pelas clorofilas.

A radiação solar, ao atravessar a atmosfera, é refletida, absorvida e transmitida. A energia que chega à superfície terrestre é a energia refletida e transmitida. Em superfícies aquáticas, parte dessa energia penetra na coluna da água e outra parte é refletida, voltando à atmosfera (Esteves, 1998; Novo, 2001).

A radiação, ao penetrar na água, muda imediatamente de direção, ou seja, ocorre a refração em função da redução da velocidade ao penetrar o meio líquido. Parte dessa energia é absorvida e transformada em outras formas de energia, como a fotossíntese e o aumento calorífico da água. A capacidade de absorção da radiação pela água é caracterizada pela variação do coeficiente de absorção (Esteves, 1998), dado pela equação 2.3.

$$a_t = a_a + a_d + a_c + a_p \quad (2.3)$$

Onde:  $a_t$  é o coeficiente de absorção total;  $a_a$  é o coeficiente de absorção da água;  $a_d$  são os componentes dissolvidos;  $a_c$  são os organismos clorofilados e  $a_p$  são os detritos particulados.

A dispersão da radiação eletromagnética na água é dada pelo desvio de sua trajetória original, que está relacionada à molécula da água, e principalmente pelas substâncias dissolvidas e em suspensão. O menor tamanho das partículas repercute no maior espalhamento da radiação. E o aumento da dispersão aumenta a possibilidade da radiação ser absorvida ou refletida para a superfície.

Os processos que influenciam a radiação na água são a absorção e o espalhamento. Essas são duas propriedades ópticas inerentes da água, porque seus coeficientes variam apenas com as propriedades do meio aquático e não com as propriedades do campo de luz incidente (Novo, 2001). Esses processos são quantificados por meio dos coeficientes de absorção e espalhamento, respectivamente.

Esses coeficientes dependem da concentração e do tipo de material suspenso ou dissolvido na água. Essas substâncias opticamente ativas podem afetar o espectro de absorção e espalhamento da água pura (Novo, 2001; Barbosa et al., 2003). A absorção é sempre seletiva e depende dos componentes dissolvidos e em suspensão na água. O espalhamento pode ser seletivo ou não seletivo, sendo provocado pela própria água e pelas partículas em suspensão na água.

Ao penetrar na coluna da água, a radiação sofre alterações quantitativas e qualitativas, ou seja, a quantidade de energia inicial é atenuada, na medida em que o feixe é transmitido para as camadas mais profundas. Essa atenuação é seletiva e o decaimento da potência é exponencial, ou seja, diminui rapidamente nos primeiros metros e depois mais e mais lentamente, até o limite da zona eufótica. Assim, a quantidade e qualidade da luz disponível na coluna da água apresentam relação com a composição da água e com seus componentes físicos, químicos e biológicos (Kirk, 1994).

A radiação que chega ao sensor pode se originar de quatro formas: da reflexão do fluxo de radiação direta do Sol que atinge a superfície aquática, da reflexão do fluxo de radiação difusa que atinge a superfície aquática, do fluxo espalhado pela atmosfera e do fluxo emergente ou espalhado no interior do volume de água que sai da coluna da água após atravessar a interface água e ar (Kirk, 1994; Novo, 2001). Eventualmente, podem ocorrer participações dos sedimentos em locais pouco profundos e/ou com extensa zona fótica.

O fluxo emergente contém informações sobre a composição do meio aquático. Os dados de sensoriamento remoto obtidos de um corpo da água contêm informações de todos os componentes simultaneamente. Entretanto, um grande problema na interpretação dos dados de sensoriamento remoto é quantificar o fluxo emergente na presença dos demais (Novo, 2001).

Em condições atmosféricas de ventos de pouca intensidade aproximadamente de 2% a 6% da energia incidente é refletida. A reflexão interna da radiação emergente, no entanto, pode aumentar com a rugosidade da superfície. Esse efeito pode ser desprezível quando a energia emergente na coluna da água incide sobre a interface água e ar segundo pequenos ângulos (Noernberg et al., 1996; Novo, 2001).

## 2.2 – Constituintes opticamente ativos da água

A água, no seu estado líquido, reflete basicamente na região do visível e estreita faixa do infravermelho próximo. Nessas regiões do espectro há uma maior quantidade de energia disponível para interagir com o corpo da água e refletir. A diferença do estudo do comportamento espectral da água em relação aos demais alvos é que, quando se estuda o comportamento de uma rocha, por exemplo, o que se busca é conhecer as propriedades daquela rocha, mas, quando se estuda o comportamento da água, o que se busca conhecer são os componentes que se encontram nela dissolvidos ou nela suspensos (Novo, 2001). Nesse contexto, a porcentagem de energia refletida pelos corpos da água é relativamente menor que aquela refletida pela vegetação e solo exposto, conforme ilustrado na Figura 2.1.

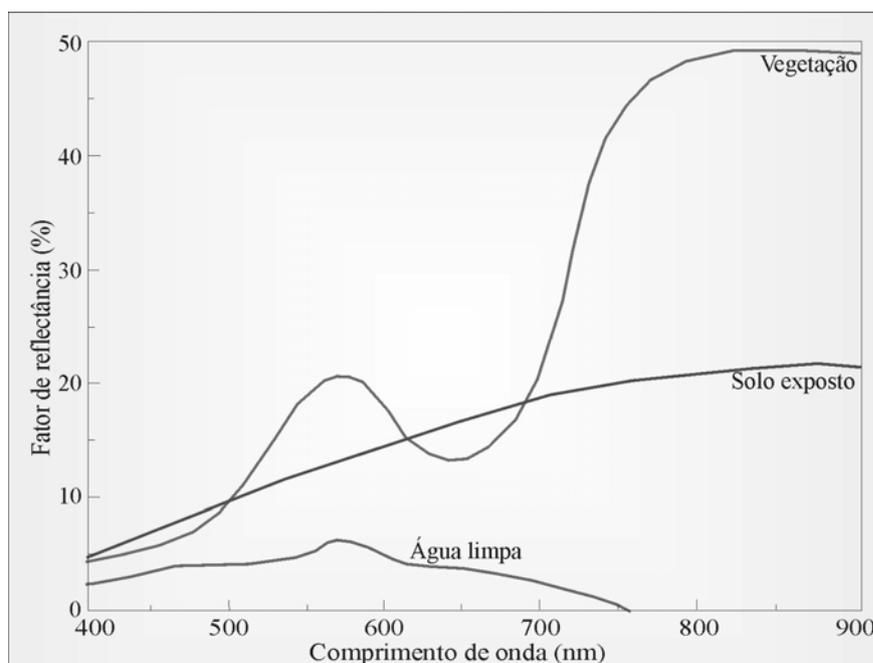


Figura 2.1 - Comportamento espectral da água, vegetação e solo exposto

Fonte: Adaptado de Jensen (1998).

Em águas naturais, os constituintes opticamente ativos (COAs) presentes na subsuperfície têm papel determinante sobre as propriedades ópticas inerentes de corpos da água. Sólidos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes e substâncias húmicas são os principais COAs responsáveis pela variação do comportamento espectral da água. As propriedades de absorção e espalhamento dos COAs irão definir seletivamente a forma e amplitude final da curva de reflectância.

O coeficiente de absorção da água pura é mínimo na região compreendida entre 400 e 500 nm, aumentando rapidamente na região do infravermelho próximo. De uma forma geral,

pode-se dizer que, até em torno de 450 nm, a absorção pela água pura é desprezível e praticamente toda energia que atravessa a interface ar/água atravessa em quase toda sua totalidade os primeiros metros (Figura 2.2, curva a) (Novo, 2001).

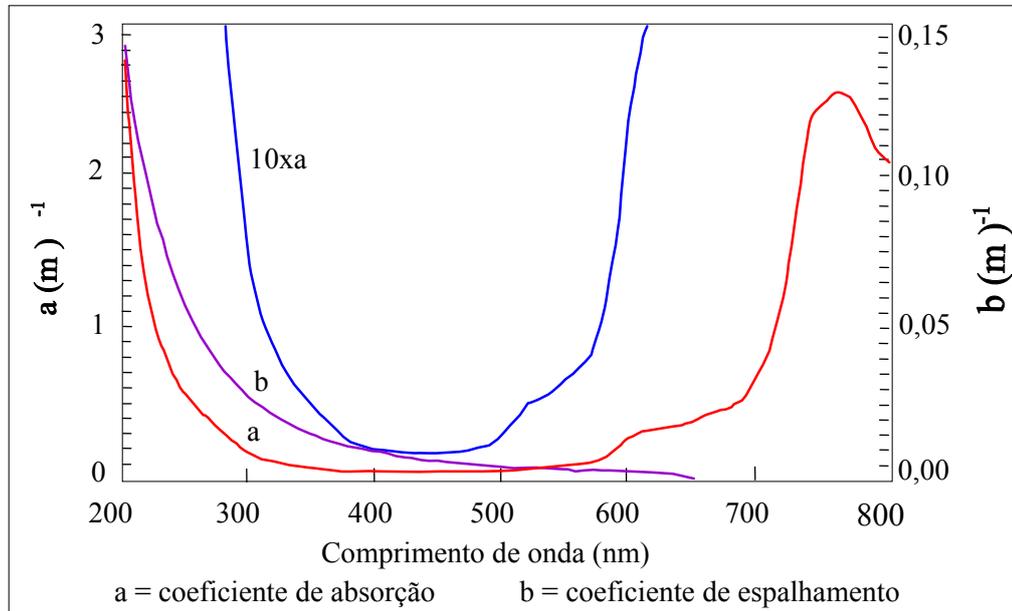


Figura 2.2 - Coeficiente de absorção e de espalhamento da água pura

Fonte: Mobley, 1994 citado em Novo, 2001.

O coeficiente de espalhamento (Figura 2.2, curva b) da água pura é máximo na região do azul e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho. Se o espectro de reflexão da água pode ser estimado pela razão  $(b/a)$ , pode-se concluir que a energia refletida pela água pura é máxima na região do azul e decresce em direção ao vermelho. Portanto, pode-se concluir que a água pura, quando observada a partir de um satélite, tenderá a apresentar a cor azul, principalmente se a dimensão do corpo de água for suficiente para atenuar os efeitos das margens e fundo (Esteves; 1998; Novo, 2001; Barbosa et al., 2003).

Estudos relatados por Kirk (1994) mostram que as partículas responsáveis pela maior proporção do espalhamento no meio aquático possuem diâmetros maiores que dos comprimentos de onda com que interagem. O espalhamento por partículas maiores que o comprimento de onda da radiação incidente é geralmente explicado pela teoria de Mie (Kirk, 1994; Mobley, 1994) e por mecanismos de difração da luz. A principal diferença entre o espalhamento por partículas grandes em relação ao espalhamento por partículas pequenas é que o primeiro é não seletivo, ou seja, é constante para os diferentes comprimentos de onda. Como o espalhamento é proporcional também ao número de partículas no meio aquático e

como para um mesmo peso de partículas, há maior número de partículas pequenas, em geral, partículas finas resultam em maiores coeficientes de espalhamento.

Para o estudo de ambientes aquáticos, por meio de sensoriamento remoto, o que mais interessa é o coeficiente de retroespalhamento, ou seja, aquela fração do coeficiente de espalhamento que representa a integração da energia espalhada na direção oposta à de incidência. Essa fração é responsável pela formação de um fluxo de energia emergente em direção à superfície da água e que chegará ao sensor. Algumas substâncias presentes na água afetam esses coeficientes de modo seletivo, provocando alterações nos valores dos coeficientes ao longo do espectro eletromagnético. Outras substâncias não afetam a qualidade espectral do fluxo absorvido ou espalhado, mas apenas na sua quantidade (Novo, 2001).

Existem também propriedades ópticas que são afetadas tanto pela composição do corpo da água quanto pelas características do campo de luz incidente sobre a água. A essas propriedades dá-se o nome de propriedades ópticas aparentes, pois os valores das grandezas medidas podem modificar-se com alterações no campo de luz incidente sobre a água. Dessa forma, o fluxo retroespalhado é uma propriedade óptica aparente porque sua magnitude dependerá do fluxo incidente (Novo, 2001).

A absorção de luz no meio aquático é decorrente da presença de quatro componentes básicos: a própria água, substâncias dissolvidas na água, biota fotossintetizadora (fitoplâncton e macrófitas quando presentes) e partículas não vivas (partículas orgânicas mortas e partículas inorgânicas) (Kirk, 1994; Esteves, 1998; Novo, 2001).

O fluxo de energia detectado por um sensor remoto é diretamente proporcional ao coeficiente de retroespalhamento da água e inversamente proporcional ao seu coeficiente de absorção. Como os coeficientes de absorção e espalhamento da água são afetados pelo tipo, concentração e composição de substâncias presentes no corpo da água, pode-se dizer que corpos da água com diferentes composições apresentarão diferenças sensíveis em sua cor e, portanto, em seus espectros reflexivos. Dessa forma, se conhecidos os efeitos que os diferentes componentes exercem sobre os coeficientes de absorção e espalhamento da água, é possível inferir algumas de suas propriedades, com base nas variações da reflectância apresentadas em imagens de satélite (Novo, 2001).

A reflectância da água pura pode ser alterada, quando introduzidas substâncias que aumentam o coeficiente de absorção da mesma nas regiões espectrais diferentes, daquelas de absorção da própria água. Na Figura 2.3, podem ser observados espectros de absorção de quatro tipos de água: pura, com substâncias húmicas, com fitoplâncton e com detritos. As substâncias orgânicas dissolvidas caracterizam-se por aumentar o coeficiente de absorção do

meio aquático, principalmente na região do azul. É verificado que a presença de matéria orgânica dissolvida em corpos da água desloca o máximo de reflectância espectral para o verde-amarelo, enquanto que a presença de matéria inorgânica em suspensão resulta num deslocamento em direção ao vermelho (Kirk, 1994; Esteves, 1998).

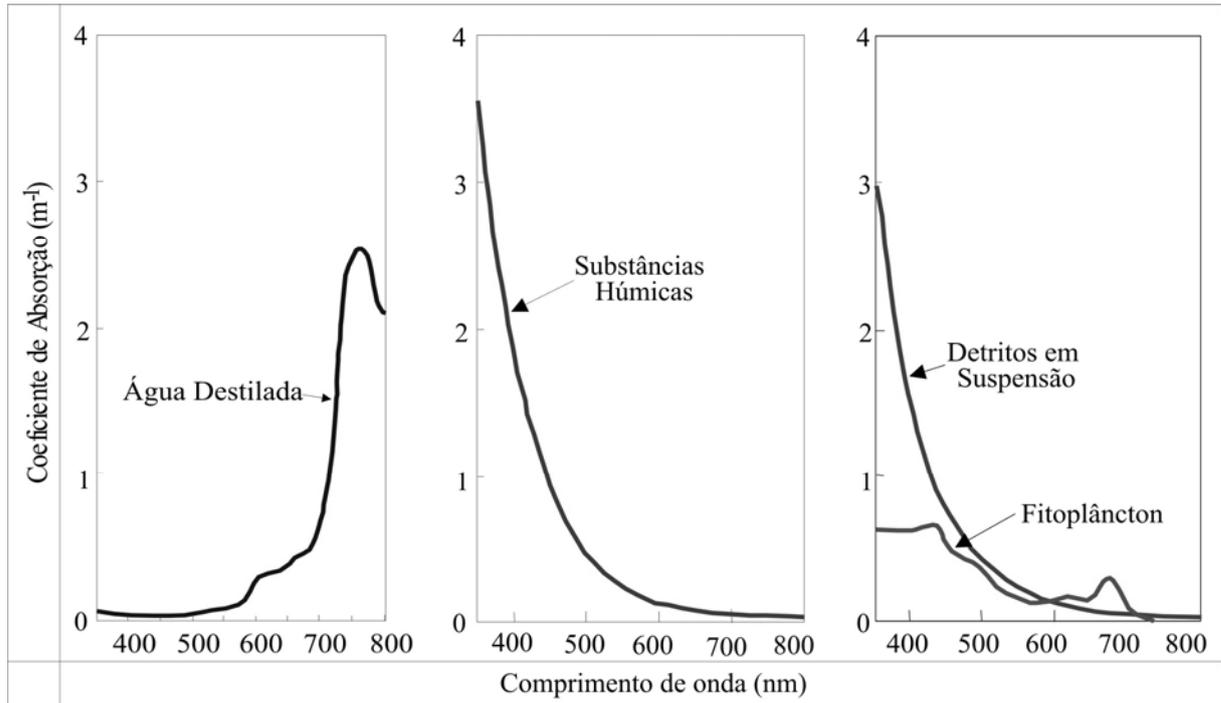


Figura 2.3 - Coeficiente de absorção da água e das substâncias presentes na água

Fonte: Adaptado de Esteves, 1998.

Sólidos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes e matéria orgânica dissolvida são os principais componentes responsáveis pelo comportamento espectral da água (Barbosa et al., 2003). As regiões de absorção e espalhamento desses constituintes da água é que vão definir a forma final da curva de reflectância, enquanto sua concentração é responsável pela magnitude das feições e pela magnitude da energia refletida em subsuperfície (Kirk, 1994).

O fitoplâncton é o responsável pela produção de matéria orgânica, através da utilização de nutrientes inorgânicos e energia solar. As partículas inorgânicas são formadas por siltes e minerais de argila, que são carregados para os corpos da água por ação do vento ou da chuva e pela ressuspensão ou erosão do fundo, podendo também conter conchas carbonáticas de moluscos e carapaças silicosas de certas algas planctônicas. A interação dos sólidos em suspensão na água com a radiação eletromagnética (REM) depende da sua natureza, granulometria e concentração das partículas (Curran e Novo, 1988).

### 2.2.1. Pigmentos fotossintetizantes

O fitoplâncton responde pela absorção da luz na água. Seus pigmentos responsáveis pela fotossíntese – clorofilas, carotenóides e biliproteínas - causam a absorção seletiva da radiação eletromagnética que penetra na água. A maior parte das plantas possui clorofilas *a*, *b*, *c* e mais raramente *d*. A clorofila *a* ocorre em maior abundância (Londe et al., 2005). A razão entre a concentração de clorofila *a* e *b* varia também de espécie para espécie, podendo atingir valores mínimos em torno de 1,0 mg/L em espécies marinhas e até 6,0 mg/L como o encontrado para a *Euglenofita* (Novo, 2001).

A clorofila *a* funciona como centro de reação fotossintética e possui dois picos de absorção: um no azul (em 433 nm, chamado "Soret") e outro no vermelho (em 686 nm, chamado pico "alpha") (Kirk, 1994). A clorofila *a* absorve fracamente entre 450 e 650 nm e a clorofila *b* tem o efeito de aumentar a absorção dentro desta janela, tanto para o lado dos comprimentos de onda mais longos quanto para os mais curtos. Essa combinação de pigmentos, de acordo com Weaver e Wrigley citado por Londe et al. (2005), seria suficiente para mapear essas algas por sensoriamento remoto.

A identificação de algas por sensoriamento remoto hiperespectral é possível para determinados grupos, mas é um procedimento complexo para a distinção de gêneros. Enquanto a clorofila é o principal constituinte responsável pelas variações temporais e espaciais no espectro de reflectância de águas oceânicas, as águas interiores contêm quantidades de carbono orgânico dissolvido e matéria particulada inorgânica que dificultam a interpretação do espectro de reflectância (Londe et al., 2005).

O comportamento do fitoplâncton no Lago Curuai, verificado por Novo (2005) e Novo et al. (2006) utilizando imagens MODIS/Terra, é caracterizado pelo máximo de reflectância na faixa espectral do verde e a uma redução da reflectância do azul e do vermelho devido à absorção pelos pigmentos. A absorção do vermelho não foi tão acentuada quanto à do azul, devido ao espalhamento por partículas em suspensão presentes na água. A distinção entre a resposta espectral de águas com grandes florescimentos de algas e águas com alta concentração de partículas inorgânicas é dada pelo aumento da reflectância da fração de partículas inorgânicas na banda do vermelho, e sua relativamente alta reflectância na banda do infravermelho próximo. Na Tabela 2.1, observam-se as principais bandas de absorção dos pigmentos do fitoplâncton.

Tabela 2.1 - Bandas de absorção dos pigmentos fotossintetizadores

Pigmentos	Bandas de absorção ( nm )
Clorofila a	435/675
Clorofila b	480/650
Clorofila c	440/645

Fonte: Novo (2001)

Os coeficientes máximos de absorção da clorofila na região do azul e do vermelho estão associados às clorofilas a e b, e seus picos de absorção em 430 nm e 665nm, respectivamente. A clorofila ocorre abundantemente nas mais diferentes espécies de algas e sua concentração, em miligrama, geralmente é utilizada como uma medida da abundância de fitoplâncton. As concentrações de clorofila para os vários tipos de água podem variar de 0,01 µg/L em águas oceânicas claras até 10 µg/L em regiões muito produtivas.

Os métodos de sensoriamento remoto em estudos de fitoplâncton fazem uso do conhecimento de que as células fotossintetizadoras absorvem a radiação solar em comprimentos de onda bem definidos na faixa do visível do espectro eletromagnético. De modo geral, os pigmentos fotossintéticos provocam feições de absorção na faixa do azul (400 - 515 nm), enquanto que o processo de espalhamento interno nas células do fitoplâncton aumenta a reflectância na faixa do verde (515 - 600 nm). Como as algas são partículas refratoras, elas provocam também o aumento de espalhamento em comprimentos de onda do infravermelho próximo (700 - 900 nm).

Alguns pigmentos presentes no fitoplâncton, como as clorofilas *a*, *b* e *c*, são os principais componentes de absorção da radiação eletromagnética no meio aquático. A absorção realizada por esses pigmentos é proporcional à sua concentração e apresenta caráter seletivo, ou seja, a energia incidente é absorvida em bandas espectrais específicas, permitindo, portanto, a sua identificação (Kirk, 1994).

De modo geral, os pigmentos que atuam na fotossíntese provocam a diminuição da reflectância nas faixas do azul (400-515 nm) e do vermelho (630-700 nm) e o aumento na faixa do verde (515-600 nm) (Figura 2.4). O aumento de reflectância no verde é atribuído ao fato de ocorrer o processo de espalhamento interno nas células dos organismos fitoplanctônicos. De fato, essas algas são partículas refratoras e, portanto, provocam o aumento do espalhamento, também, em comprimentos de onda do infravermelho próximo (IVP) (Mantovani, 1993; Kirk, 1994; Rudorff, 2006).

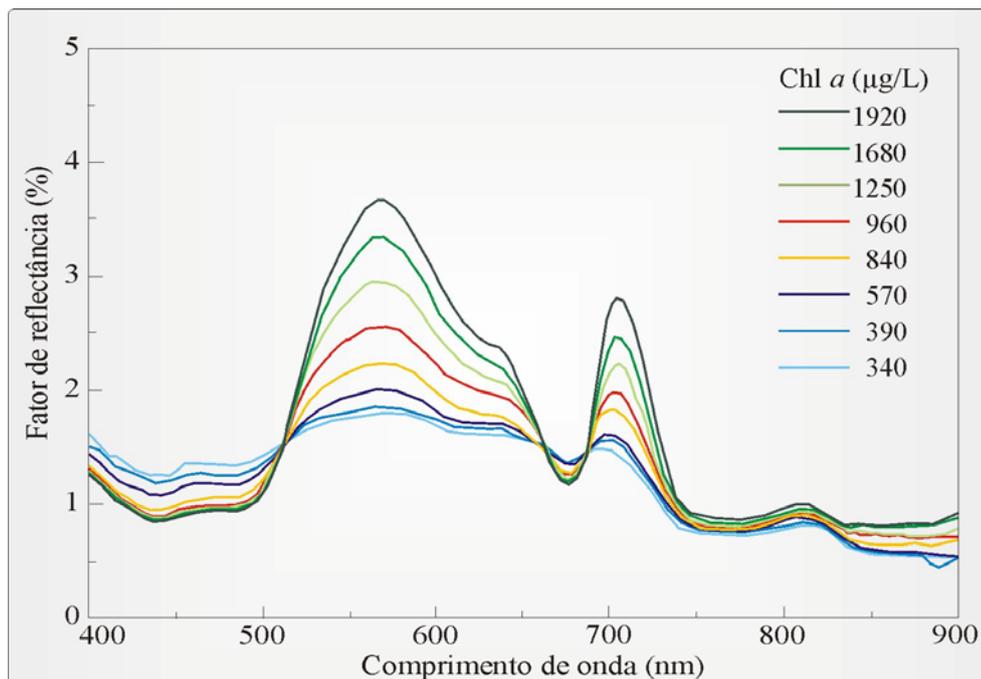


Figura 2.4 - Variação da reflectância da água sob diferentes concentrações de clorofila *a*

Fonte: Adaptado de Rundquist et al. (1996).

### 2.2.2. Partículas em suspensão

O comportamento espectral da água também é diretamente afetado pela concentração de sólidos em suspensão. O aumento da concentração de sólidos em suspensão ocasiona aumento da reflectância do volume da água e o deslocamento do máximo de reflectância da água em direção a comprimentos de onda mais longos.

A região mais sensível, quando há presença de sólidos em suspensão, é a região compreendida entre o verde e o vermelho. Isso faz com que, em composições coloridas, rios com alta concentração de sólidos em suspensão apresentem a cor amarela.

Kirk (1994) avaliou a reflectância dos sólidos em suspensão no reservatório do Mississippi considerando comprimentos de onda entre 450 a 900 nm. Os melhores resultados encontrados pelo autor, com a correlação entre o TSS e a reflectância foi aos comprimentos de onda entre 700 e 800 nm.

O material particulado, no entanto, tem como principal efeito o aumento do coeficiente de espalhamento da água. De fato, tanto as medidas feitas no campo quanto os experimentos de laboratório têm demonstrado que há aumento do coeficiente de espalhamento da água com o aumento da concentração de TSS na água (orgânicos e não-orgânicos) (Novo, 2001).

A análise da Figura 2.5 indica que a maior concentração de TSS proporciona um deslocamento da reflectância máxima da água em direção a comprimentos de onda mais longos. Outra característica, observada na figura, é a ampliação da região espectral em que ocorre esse máximo que passa a se comportar como um patamar de reflectância quase constante entre 500 e 700 nm. O crescimento da reflectância na região do infravermelho também é expressivo (Novo, 2001).

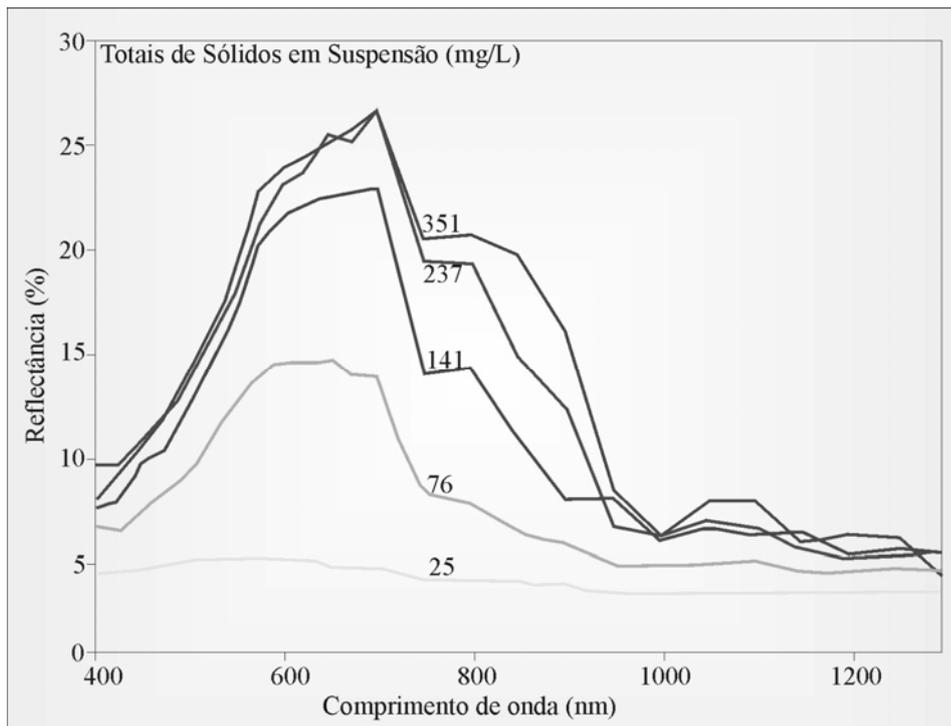


Figura 2.5 - Relação entre a reflectância e os comprimentos de onda afetados por diferentes concentrações de Totais de Sólidos em Suspensão

Fonte: Ritchie et al., 1976.

### 2.2.3. Substâncias orgânicas dissolvidas

As partículas orgânicas ocorrem em diversas formas, tais como: vírus, colóides, bactérias, fitoplâncton, detritos orgânicos, zooplâncton. Individualmente, vírus e colóides não são espalhadores eficientes de luz, visto que suas dimensões são menores que os comprimentos de onda do visível. Entretanto, estudos recentes mostram que essas partículas, devido à grande concentração com que ocorrem na água, contribuem significativamente para o retroespalhamento (Novo, 2001).

A presença de matéria orgânica dissolvida (gilvin ou substância amarela) é um dos componentes responsáveis pelo aumento do coeficiente de absorção da água. A absorção por

matéria orgânica dissolvida em um lago revela que sua presença na água provoca profundas modificações no processo de absorção da luz no meio aquático.

Estudos relatados por Mobley (1994), citado em Novo (2001), sugerem que, conforme aumenta a concentração de matéria orgânica dissolvida na água, a reflectância da região azul diminui até um ponto em que os máximos de reflectância passam a ocorrer na região do verde e vermelho, o que dá à água uma cor amarela. Quando a concentração de substâncias orgânicas dissolvidas é muito grande, como no caso do rio Negro, por exemplo, a absorção suplanta o espalhamento e praticamente não há energia retroespalhada pelo volume d'água, que adquire uma aparência negra quando em grande volume.

Novo (2001) coloca ainda que simulações em laboratório, realizadas por Mantovani (1993), permitiram avaliar o efeito do aumento da concentração de substâncias orgânicas dissolvidas na água sobre seu Fator de Reflectância Bidirecional (FRB). Com o aumento da concentração da matéria orgânica dissolvida, há redução de reflectância da água na região do azul e do verde. Na região do vermelho (em torno de 650 nm), a reflectância praticamente não é modificada com a variação da concentração de matéria orgânica e, na região do infravermelho, a reflectância da água aumenta com a matéria orgânica dissolvida (Figura 2.6).

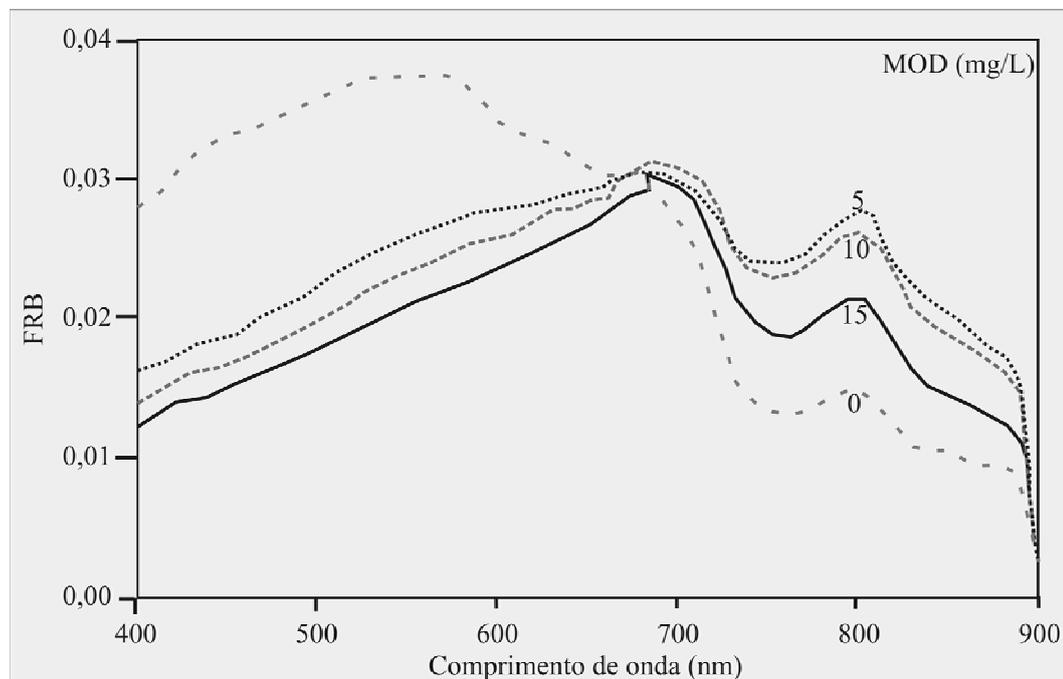


Figura 2.6 - Fator de Reflectância Bidirecional de simulações em laboratório de um corpo d'água com diferentes concentrações de matéria orgânica dissolvida.

Fonte: Adaptado de Mantovani (1993).

Dessa forma, pode-se concluir que, com o aumento da concentração de matéria orgânica dissolvida na água, essa tenderá a uma cor primeiro amarela, depois mais vermelha escura devido aos baixos níveis de reflectância (Novo, 2001).

Na prática, verifica-se que é difícil isolar a influência dos constituintes ópticamente ativos uns sobre os outros. Segundo Kirk (1994), em faixas de comprimento de onda entre 450 e 900 nm, o aumento da concentração de partículas inorgânicas em suspensão aumenta mais o coeficiente de retroespalhamento da água, em relação ao coeficiente de absorção, provocando aumento da radiação emergente. Isso dificulta o estabelecimento de relações entre medidas de espectroscopia e concentração de clorofila *a*, podendo tornar-se inviável em casos de águas com elevada turbidez.

A concentração de sólidos em suspensão, por sua vez, apresenta uma relação linear com dados de reflectância somente na faixa do vermelho e do infravermelho próximo onde a absorção da radiação incidente é governada, predominantemente, pela própria água, com pequena contribuição dos demais constituintes.

### **2.3 Imagens orbitais multiespectrais**

As imagens de satélite são essenciais na detecção e no controle de situações desfavoráveis ao meio ambiente, sendo possível realizar um levantamento da situação atual da ocupação e transformação do meio ambiente, e principalmente a possibilidade de estudar processos físicos inerentes ao alvo. As imagens são obtidas por câmeras de imageamento ou sensores a bordo de satélites, a exemplo do sensor CCD do satélite CBERS 2 e do sensor TM do satélite Landsat 5.

As características dos sensores CBERS 2 CCD e Landsat 5 TM são parecidas (Tabela 2.2). As quatro bandas multiespectrais do sensor CCD apresentam intervalos espectrais semelhantes às primeiras quatro bandas do sensor TM. Ambos os sensores apresentam a mesma resolução radiométrica (8 bits). Tendo por base essas características, torna-se possível o uso concomitante dos dois sensores para o estudo de sistemas aquáticos.

A imagem TM 1, referente à banda do azul, pode ser utilizada para mensurar a atenuação da irradiância causada pela absorção na água da matéria orgânica dissolvida e clorofila *a*; a TM 2, banda do verde, pode ser utilizada para verificar a concentração de fitoplâncton; e a TM 3, banda do vermelho, pode ser usada principalmente para avaliar a concentração de sólidos em suspensão (Dekker, 1993; Giardino et al., 2001).

Tabela 2.2 - Características dos sensores CBERS 2 CCD e Landsat 5 TM

Características	CBERS 2 CCD	Landsat 5 TM
Bandas Espectrais	0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$ (Azul)	0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$ (Azul)
	0,52 - 0,59 $\mu\text{m}$ (Verde)	0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$ (Verde)
	0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ (Vermelho)	0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ (Vermelho)
	0,77 - 0,89 $\mu\text{m}$ (IVP)	0,76 - 0,90 $\mu\text{m}$ (IVP)
Resolução Temporal	26	16
Resolução Espacial	20	30
Resolução Radiométrica	8	8

Fonte: Nasa, 2006; Epiphânio, 2005.

#### 2.4.- Correção atmosférica

Sensores orbitais com bandas espectrais no visível e no infravermelho próximo têm contribuição da atmosfera nos alvos registrados nas imagens. A região do azul apresenta uma maior influência dos efeitos do espalhamento da atmosfera. Na interpretação da água em imagens de satélite, por exemplo, cerca de 90% da radiância, registrada pelo sensor orbital, podem ser atribuídas aos efeitos da atmosfera, que também é conhecida como radiância de trajetória. Essa radiância de trajetória é provocada principalmente pelo espalhamento que a luz solar sofre na presença das moléculas dos gases constituintes da atmosfera e de partículas nela presentes (Novo, 2001).

Para estimar o valor do fluxo emergente, é fundamental que a radiância de trajetória seja removida da radiância detectada pelo sensor. Existem diversos métodos para estimar e corrigir o sinal registrado e convertem o dado para reflectância. Entre os métodos mais utilizados podem ser citados 5S e 6S (Vermote et al., 1997).

A grandeza radiométrica medida pelo sensor é a radiância, mas a propriedade radiométrica da água que se relaciona com seus componentes é a reflectância. Para se estimar adequadamente a reflectância, não basta apenas corrigir a radiância medida pelo sensor. É preciso avaliar a irradiância que atinge a superfície da água. A irradiância incidente na superfície varia com o ângulo zenital do Sol. Para se obter a radiância da água (Novo, 2001) é utilizada a equação 2.4.

$$L_w = L_w' / \cos(\theta) \quad (2.4)$$

Onde:  $L_w$  é a radiância da água;  $L_w'$  é a Radiância da água medida pelo sensor após a correção atmosférica; e,  $\theta$  é o Ângulo zenital do sol.

As condições de tempo como o vento, presença de sol e características da superfície aquática interferem nos espectros de reflectância. Estudos que avaliaram a influência de diferentes condições de tempo sobre o espectro da água foram realizados por Pereira Filho et al. (2005) na planície Amazônica. Nesse experimento, amostras de água foram coletadas em campo sob diferentes condições de tempo: com a presença de sol e brisas fracas, com tempo ventoso e com condições de tempo nublado. A partir disso, conclui-se que, em condições de tempo nublado, há um aumento do albedo da água; enquanto em condições de tempo ventoso, essa característica se atenua. Dessa forma, a situação mais aconselhável para coleta de amostras ocorre em condições de tempo com sol.

*"Até onde as leis da matemática se referem à realidade, elas estão longe de constituir algo certo; e, na medida em que constituem algo certo, não se referem à realidade."*  
**Albert Einstein**

### 3. – METODOLOGIA

A metodologia utilizada seguiu o fluxograma apresentado na Figura 3.1. Na seqüência, as etapas serão descritas de forma detalhada.

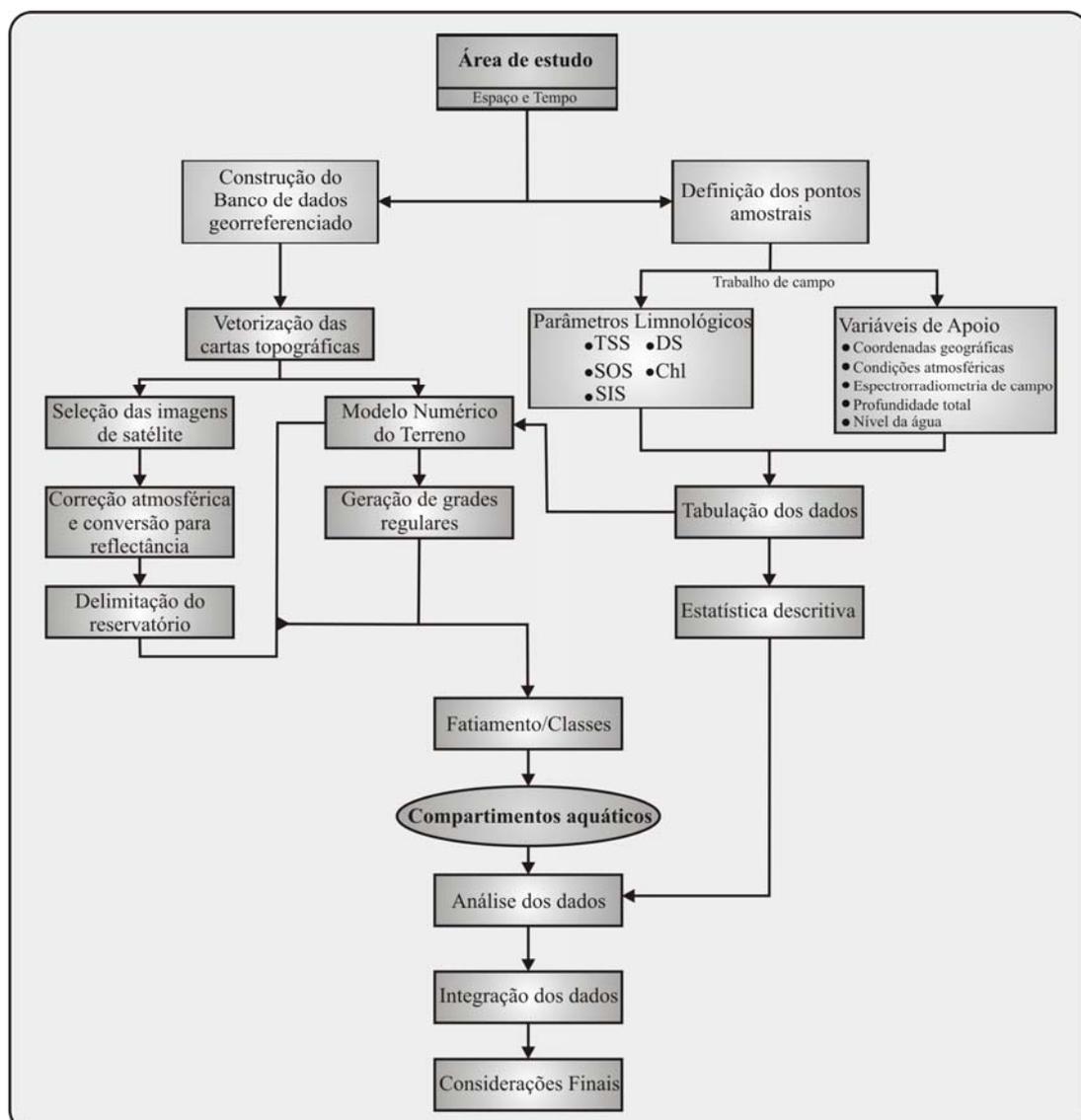


Figura 3.1 - Fluxograma utilizado para o desenvolvimento da pesquisa

As atividades de campo no reservatório Rodolfo Costa e Silva foram realizadas, principalmente com o uso de um barco. Em cada atividade, foram amostrados 21 pontos. Estes foram distribuídos geograficamente, considerando as classes obtidas com a classificação não-supervisionada (Classificador Isoseg) da imagem do sensor CBERS 2 CCD, bandas 1, 2, 3 do dia 21 de outubro de 2004, adaptado de Breunig (2006).

A distribuição amostral contemplou o centro e as reentrâncias do reservatório (Figura 3.2). As reentrâncias ocorrem com a inundação dos canais e parte dos vales e, assim, de uma sub-bacia como já foi verificado na Figura 1.1. Essas condições dispõem ao reservatório diferentes situações e formar áreas mais susceptíveis a ter características próprias.

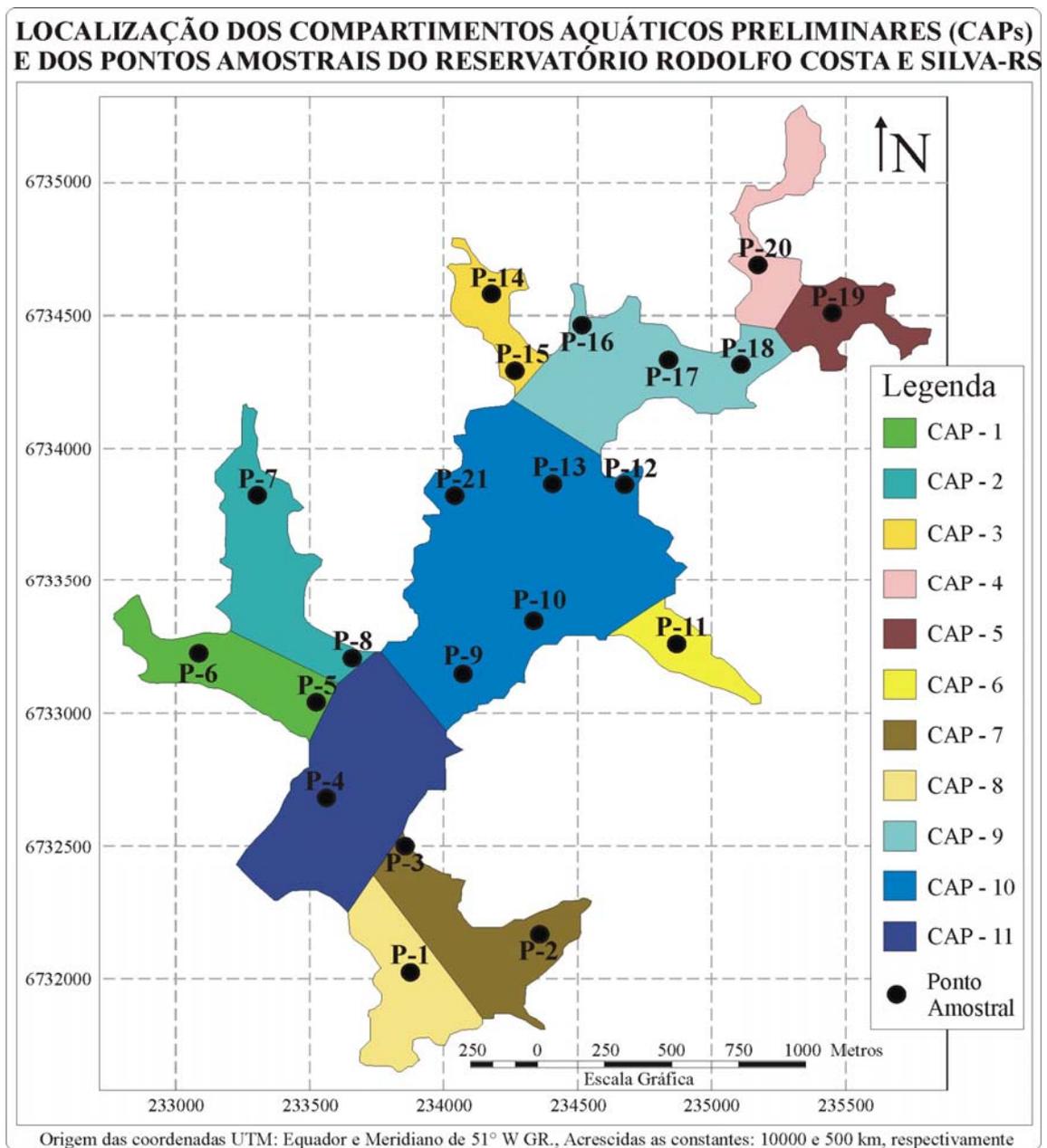


Figura 3.2 - Localização dos compartimentos aquáticos preliminares e dos pontos amostrais

A individualização prévia das áreas em função da geometria (reentrâncias) e dos ambientes (lótico, intermediário e lêntico) do reservatório foi definida como Compartimentos Aquáticos Preliminares (CAPs). Dos compartimentos, oito estão associados às reentrâncias e três ao corpo central do reservatório. Este último divide-se nos setores montante (CAP-9), intermediário (CAP-10) e dique ou jusante (CAP-11).

### 3.1 - Trabalhos de campo e medidas limnológicas

Os trabalhos de campo consistiram na coleta de dados limnológicos, características do entorno amostral e das condições atmosféricas. Essas coletas de campo foram realizadas, quando possível, na data de passagem do satélite CBERS 2; porém, nas duas últimas datas, coincidiram com a passagem do satélite LANDSAT 5. Os pontos amostrais foram georreferenciados com aparelho GPS Garmin Etrex de precisão de 5 metros.

A transparência do Disco de Sechi (DS) e Totais de Sólidos em Suspensão (TSS) foram medidos em todos os trabalhos *in situ* e os Sólidos Orgânicos em Suspensão (SOS) e Inorgânicos em Suspensão (SIS) foram determinados para 9c(16/05/2006) e 13c(26/09/2006). A clorofila (chl) *a*, *b* e *c* foi determinada para a 8c(20/04/2006) e 9c(16/05/2006). Ainda, em 9c(16/05/2006), obtiveram-se dados de Espectrorradiometria de Campo (EC). A Profundidade Total (PT) foi medida na 4c(06/01/2006). A Tabela 3.1 mostra as saídas de campo realizadas e os dados coletados.

Tabela 3.1 - Saídas de campo e os dados coletados

Coleta	Data	DS	TSS	SOS	SIS	Chl	EC	PT
1 <sup>a</sup>	20/10/2005							
2 <sup>a</sup>	18/11/2005							
3 <sup>a</sup>	14/12/2005							
4 <sup>a</sup>	06/01/2006							
5 <sup>a</sup>	01/02/2006							
6 <sup>a</sup>	27/02/2006							
7 <sup>a</sup>	25/03/2006							
8 <sup>a</sup>	20/04/2006							
9 <sup>a</sup>	16/05/2006							
10 <sup>a</sup>	14/06/2006							
11 <sup>a</sup>	07/07/2006							
12 <sup>a</sup>	25/08/2006							
13 <sup>a</sup>	26/09/2006							

### 3.1.1 - Transparência do disco de Secchi

A transparência da água é obtida com o mergulho do disco de Secchi. O disco utilizado era branco com 25 cm de diâmetro, sendo acoplado a uma corda graduada. Para a leitura do desaparecimento do disco de Secchi - medida de transparência - foram observadas as seguintes condições: céu claro, realização da medida na sombra, seleção de um local de mínima agitação e observação vertical do disco (CETESB, 1987).

### 3.1.2 - Total de Sólidos em Suspensão

As amostras da água foram coletadas em cada ponto amostral e acondicionadas em embalagens plásticas de 600 ml ou superiores. A filtração foi realizada no Laboratório de Sedimentologia da Universidade Federal de Santa Maria - RS. Os materiais utilizados e os procedimentos para essa variável serão descritos a seguir.

Dois tipos de filtros foram utilizados para filtração: 1) Microfibra de vidro borossilicato sem resina<sup>1</sup> (Marca Millipore - AP 40), que permite a realização do processo de filtração e calcinação; 2) Filtro de celulose<sup>2</sup> (Marca Millipore - HAWG047S0) constituído por membranas HA em Ester de Celulose com poros de 0,45  $\mu m$  e diâmetro de 47 mm (Millipore, 2006).

Os filtros passaram por uma secagem inicial de 24 horas em estufa a uma temperatura de 50 °C para a perda da umidade. A pesagem ocorreu na balança analítica da marca Mettler Toledo - modelo AG 245 (acurácia 0,0001 g) para a obtenção do Peso Inicial ( $P_i$ ). Após a filtração, os filtros retornaram à estufa, cuja metodologia é igual ao  $P_i$ . E, com a pesagem, é obtido o Peso Final ( $P_f$ ).

No processo de filtração<sup>3</sup>, o filtro é colocado na base de apoio de um funil preso por prendedor metálico e ajustado à rolha de um frasco de Kitasato, unindo a bomba de vácuo a uma torneira (Figura 3.3). O volume de água filtrado manteve-se invariável em cada

---

<sup>1</sup> Sem resina ligante, significa que os filtros mantêm integridade estrutural sem perda de peso, quando calcinados a 550 °C e são recomendados pelo fabricante para obtenção pelo método padrão de Total de Sólidos em Suspensão (Millipore, 2006).

<sup>2</sup> Filtro indicado para análises microbiológicas (Millipore, 2006), que, em função do tamanho dos poros, é muito eficiente para obtenção do TSS.

<sup>3</sup> Após a realização de alguns testes em laboratório com filtro de microfibra de vidro, recomenda-se, no processo de filtração, usar um maior volume de água possível. Nas águas do reservatório Rodolfo Costa e Silva, por exemplo, recomenda-se o uso de um volume mínimo de 1000 ml. Justifica-se que a capacidade de retenção de sólidos varia em função do volume de água filtrado, dada a necessidade do preenchimento dos poros.

amostragem, porém com variação entre as coletas; como critério, considerou-se um tempo máximo de 20 minutos para a filtragem de uma amostra.

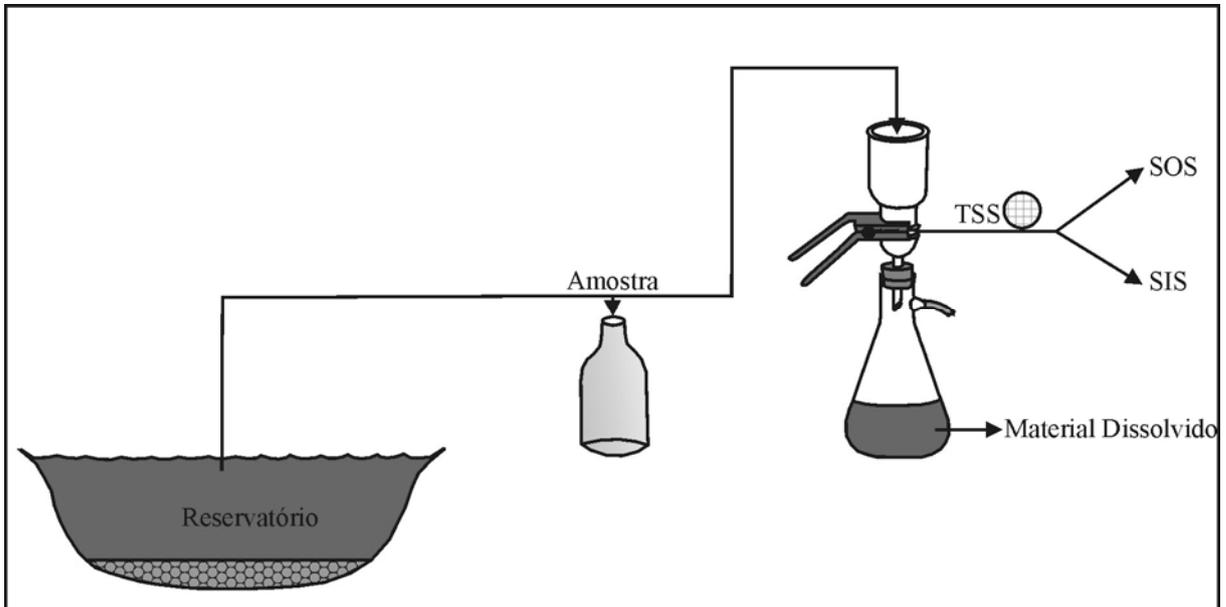


Figura 3.3 - Processo para a obtenção do TSS.

Fonte: Adaptado de Esteves, 1998.

Os filtros de celulose perderam massa durante o processo de filtragem ( $P_i > P_f$ ), ou seja, a água, ao atravessar o filtro a alto vácuo, desintegra micropartículas da membrana. O fator de perda ( $F_p$ ) do filtro de celulose foi estimado com a filtragem de 0,2 L de água destilada em 10 amostras. O  $F_p$  foi calculado conforme a equação 3.1, cujo valor encontrado foi - 0,00158.

$$F_p = \frac{\sum \left[ \frac{(P_f - P_i)}{V} \right]}{N} \quad (3.1)$$

Onde:  $F_p$  é o Fator de perda;  $P_f$  é o Peso Final (g);  $P_i$  é o Peso Inicial (g);  $V$  é o Volume (L); e  $N$  é o Número de amostras.

A medida de TSS foi realizada com o uso dos dois tipos de filtro e com o uso da equação 3.2 para filtro de celulose e Equação 3.3 para o filtro microfibras de vidro.

$$TSS = \left[ \frac{P_f - P_i}{V} - (F_p \times V) \right] \times 1000 \quad (3.2)$$

Onde: *TSS* é o Total de Sólidos em Suspensão;  $P_f$  é Peso Final (g);  $P_i$  é o Peso Inicial (g);  $V$  é o Volume (L) e  $F_p$  é o Fator de perda.

$$TSS = \left( \frac{P_f - P_i}{V} \right) \times 1000 \quad (3.3)$$

Onde: *TSS* é o Total de Sólidos em Suspensão;  $P_f$  é Peso Final (g);  $P_i$  é o Peso Inicial (g);  $V$  é o Volume (L)

### 3.1.2.1 - Total de Sólidos Orgânicos e Inorgânicos em Suspensão

O *SIS* e o *SOS* foram medidos com os filtros de microfibra de vidro, os quais passaram pelo mesmo processo de filtração descrito anteriormente. Os mesmos filtros passaram pelo processo de calcinação numa mufla à temperatura de 480 °C durante uma hora. Após, os filtros foram retirados e acondicionados em um dessecador para o seu resfriamento e, assim, proceder a pesagem e obter o Peso de Calcinação ( $P_{cal}$ ). O *SOS* e o *SIS* são obtidos pelas equações 3.4 e 3.5, respectivamente.

$$SOS = \frac{(P_f - P_{cal})}{V} \times 1000 \quad (3.4)$$

Onde: *SOS* é quantidade de Sólidos Orgânicos em Suspensão;  $P_f$  é Peso Final (g);  $P_{cal}$  é Peso de Calcinação (g); e  $V$  é o Volume (L).

$$SIS = TSS - SOS \quad (3.5)$$

Onde: *SIS* são os Sólidos Inorgânicos em Suspensão; *TSS* é o Total de Sólidos em Suspensão; e *SOS* são os Sólidos Orgânicos em Suspensão.

### 3.1.3 - Clorofila

As medidas de Clorofilas *a*, *b* e *c* foram realizadas em 8c(20/08/2006) e 9c(16/05/2006), cujas datas tiveram disponibilidade logística. A determinação da clorofila foi realizada através da filtração, utilizando-se filtros de fibra de vidro. Esses foram embalados em papel alumínio, mantidos no escuro e resfriados para o seu envio ao Instituto Internacional de Ecologia (IIE), o qual determinou as clorofilas *a*, *b* e *c*. A análise foi realizada segundo o método descrito por Nush (1980) e cálculos realizados conforme a equação do método tricromático descrita em Jeffrey e Humphrey (1975).

### 3.1.4 - Espectrorradiometria de campo

O espectrorradiômetro FieldSpec<sup>®</sup> Hand Held do Laboratório de Radiometria LARAD/INPE, com faixa de operação entre 325 a 1075 nm e resolução espectral de 1 nm (ASD, 2007) foi utilizado para a aquisição dos dados espectrais da água referentes a 9c(16/05/2006). A radiância foi medida para a placa de referência de Sulfato de Bário ( $BaSO_4$ ) e, em seguida, da água. A placa de superfície lambertiana foi calibrada antes da realização da espectrorradiometria de campo em relação à placa padrão (Spectralon) em laboratório.

As medidas de cada ponto foram realizadas sob as mesmas condições de iluminação e observação, conforme Milton (1987). O espectrorradiômetro foi posicionado em cada ponto amostral sobre a embarcação a uma orientação de 90° de azimute solar e a uma inclinação de 45° de inclinação do sensor em relação à vertical, a uma altura aproximadamente de 2 m. Nesse contexto, as condições de tempo foram adequadas, ou seja, com sol, sem vento ou com brisa e com a superfície da água lisa ou com pequenas ondulações, visto que o vento é um dos efeitos mais importantes na degradação das informações espectrais em coletas de campo (Pereira Filho et al., 2005).

O fator de reflectância da amostra foi calculado conforme a equação 3.6. Na redução de ruídos dos dados espectrorradiométricos, foi aplicado um filtro de média móvel de 11 pontos.

$$R_{\text{água}}(\lambda) = \frac{L_{\text{água}}(\lambda)}{L_{\text{placa}}(\lambda)} \times R_{\text{placa}}(\lambda) \quad (3.6)$$

Onde:  $R_{\text{água}}(\lambda)$  é o Fator de reflectância bidirecional da água;  $L_{\text{água}}(\lambda)$  é o valor da radiância medido sobre a água;  $L_{\text{placa}}(\lambda)$  é o valor da radiância medido sobre a placa de referência; e  $R_{\text{placa}}(\lambda)$  é o fator da reflectância bidirecional das placas de referência.

Os dados de espectrorradiometria de campo foram relacionados com os dados de TSS e Chl *a*, *b* e *c*. Nesse sentido, a subtração e razão de bandas de absorção e espalhamento foram relacionadas com os dados de clorofila.

### 3.1.5 - Profundidade total

A profundidade total foi medida na 4c(20/04/2006) nos 21 pontos de coleta. A medida foi realizada com a corda graduada presa a um chumbo. A cada medida, adicionou-se à

distância de cota máxima do reservatório (41 cm) daquela data como resultado a profundidade máxima. A SURCEN/CORSAN disponibilizou um mapa que apresenta levantamento topográfico da área do reservatório, curvas de nível de equidistância de 1 m, antigo reservatório, diques e drenagem alagada.

### **3.1.6 - Condições Atmosféricas**

As condições atmosféricas observadas em campo foram: temperatura do ar - medida com termômetro, direção e intensidade do vento (fraco, moderado, forte e muito forte) e a cobertura de nuvens, observadas visualmente. Esses dados foram medidos e observados em todos os pontos amostrais e trabalhos de campo. A coleta das variáveis limnológicas foi realizada, preferencialmente, das 9 às 16 horas, quando as condições de iluminação solar são mais indicadas por apresentar menor variação. Essas informações foram complementadas com as registradas pela Plataforma de Coleta de Dados (PCD) junto ao Observatório Espacial do Sul/INPE, localizado em São Martinho da Serra, aproximadamente a 10 km (29°26'34" S e 53°49'23" O – altitude 489 m) do compartimento aquático preliminar central do reservatório Rodolfo Costa e Silva. Os índices de chuva e de vento a 10 m de superfície, durante o ano hidrológico, também foram adquiridos, através da PCD (INPE-CPTEC, 2007). Esses dados foram relacionados estatisticamente com as variáveis TSS e DS.

### **3.2.- Construção do Banco de Dados Georreferenciados**

Os documentos cartográficos utilizados no banco de dados geográficos foram as cartas topográficas da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército, na escala 1:50000, compreendendo as seguintes folhas: Camobi (SH22-V-C-IV-2), Rio Guassupi (SH22-V-C-I-3), Santa Maria (SH22-V-C-IV-1), Val de Serra (SH22-V-C-I-4). A área de estudo contida nas cartas topográficas foi digitalizada e georreferenciada no *software* SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas). Posteriormente, as curvas de nível, os divisores da água e a rede de drenagem foram vetorizadas. Com isso, determinaram-se as áreas das SBs, o comprimento dos canais e das curvas de nível para o cálculo de padrões de drenagem: densidade de drenagem (Equação 3.7), declividade média por sub-bacia (Equação 3.8), coeficiente de rugosidade (Equação 3.9). Esses índices foram determinados para avaliar os processos erosivos e impermeabilidade das SBs.

$$D = \frac{\sum(R,C,T)}{A} \quad (3.7)$$

Onde: D é a Densidade da rede de drenagem (km/ha);  $\Sigma(R,C,T)$  é o Somatório dos comprimentos das ravinas (R), canais (C) e tributários (T) em km; e A é a Área da SB (ha).

$$H = \frac{100 \times (\sum CN \times \Delta H)}{A} \quad (3.8)$$

Onde: H é a declividade média da SB (%);  $\Sigma CN$  é o somatório do comprimento das curvas de nível (CN) em (hm);  $\Delta h$  é a equidistância entre curvas de nível (hm); e A é a área da SB (ha).

$$RN = D \times H \quad (3.9)$$

Onde: RN é o coeficiente de rugosidade; D é a densidade da rede de drenagem (km/ha); e H é a declividade média da SB (%).

### 3.2.1.- Processamento das imagens de satélite

As imagens de satélite CBERS 2 CCD<sup>4</sup> e LANDSAT 5 TM foram utilizadas (Tabela 3.2). Em se tratando do alvo em interesse, água, e da baixa reflectância e ruídos observados para o reservatório Rodolfo Costa e Silva na faixa do infravermelho próximo com os dados espectrorradiométricos, optou-se por usar as três bandas do visível para determinar a reflectância. Ambos os sensores apresentam intervalos espectrais semelhantes com resolução radiométrica. A resolução temporal do CBERS 2 é de 26 dias e do LANDSAT 5 é de 16 dias. Cada imagem de satélite e sua data de passagem correspondem à situação próxima ou simultânea da coleta de dados limnológicos. No entanto, as imagens registradas em 3c(11/12/2005) e 10c(11/06/2006) não foram utilizadas, pois as imagens de ambos sensores apresentavam interferência atmosférica com cobertura de nuvens.

As imagens de satélite foram georreferenciadas no *software* SPRING. Inicialmente, as imagens foram redimensionadas no Impima e a conversão de formato realizada. As imagens foram registradas a partir da base *geocover*<sup>5</sup>(Nasa, 2006), para que fossem comparados *pixels* sempre da mesma região.

---

<sup>4</sup> As imagens CBERS 2 são disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mediante o cadastro e a solicitação na *Homepage*: <http://www.dgi.inpe.br/cdsr>.

<sup>5</sup> A base *geocover* constitui o mosaico de imagens ortoretificadas do sensor ETM+ Landsat 7, restauradas para a resolução espacial de 14,25 m da composição 742 RGB em formato *\*.mrsid*. Essa base pode ser adquirida na *Homepage*: <http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>.

Tabela 3.2 - Imagens orbitais utilizadas na compartimentação aquática

Coleta	Sensor	Data
1 <sup>a</sup>	CBERS 2 CCD	20/10/2005
2 <sup>a</sup>	LANDSAT 5 TM	26/11/2005
4 <sup>a</sup>	CBERS 2 CCD	06/01/2006
5 <sup>a</sup>	CBERS 2 CCD	01/02/2006
6 <sup>a</sup>	CBERS 2 CCD	27/02/2006
7 <sup>a</sup>	LANDSAT 5 TM	03/04/2006
8 <sup>a</sup>	CBERS 2 CCD	20/04/2006
9 <sup>a</sup>	LANDSAT 5 TM	05/05/2006
11 <sup>a</sup>	CBERS 2 CCD	07/07/2006
12 <sup>a</sup>	LANDSAT 5 TM	25/08/2006
13 <sup>a</sup>	LANDSAT 5 TM	26/09/2006

### 3.2.1.1 - Correção atmosférica e conversão para reflectância

A correção atmosférica das imagens CBERS-2 CCD foi realizada através do algoritmo 5 S (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum), que é um modelo de correção baseada na transferência radioativa (Vermote et al., 1997). A entrada dos dados atmosféricos no algoritmo 5S constituiu os seguintes parâmetros:

- Mês/dia/Hora em unidades decimais da obtenção da imagem;
- Latitude e Longitude do centro de cada imagem;
- Modelo de atmosfera: para todas as imagens adotou-se o modelo Tropical;
- Modelo de aerossol: para todas as imagens adotou-se o modelo continental;
- Concentração de aerossóis: estimada a partir da visibilidade (50 km);
- As correções foram feitas para cada banda, observando-se as funções de resposta dos detectores (filtro).

Conseqüentemente, usando o algoritmo 5 S, calculou-se a reflectância de superfície de cada imagem, entre a escala de 0 a 255. Essas imagens foram importadas para o aplicativo SPRING e escalonadas com escala de 0 a 100.

Nas imagens TM Landsat 5, utilizou-se o algoritmo 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum), que é o modelo mais completo de 5 S (Vermote et al., 1997). No entanto, os parâmetros utilizados na entrada para a correção atmosférica e a conversão para a reflectância das imagens TM foram parecidos com o algoritmo 5 S. O mecanismo de importação para o sistema SPRING foi o mesmo do 5S.

### 3.2.1.2 - Delimitação do reservatório nas imagens

Os principais responsáveis pela variação temporal da superfície aquática no reservatório Rodolfo Costa e Silva são: a quantidade de chuvas e o abastecimento urbano. Verificou-se a necessidade da delimitação temporal em cada imagem de satélite e a identificação dos *pixels* puros de água. Para tanto, foi testada a segmentação da imagem por crescimento de regiões. Com essa técnica, o reservatório pode ser delimitado, mas com deficiência na identificação dos *pixels* puros de água na imagem.

Um dos pressupostos, em tais condições, era a identificação e a digitalização com aplicação de contraste da banda do infravermelho próximo, mas, mesmo assim, houve dificuldade na delimitação. Melhores resultados foram encontrados com o cálculo do Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), proposto por McFeeters (1996). A principal vantagem da aplicação desse índice em imagens orbitais está na delimitação de corpos aquáticos eliminam feições do ambiente terrestre (McFeeters, 1996; Xu, 2006; Ouma e Tateishi, 2006).

No entanto, o cálculo do NDWI (McFeeters, 1996), diferenciou-se para os sensores CCD e TM conforme a equação 3.10 e 3.11, respectivamente. A banda TM 4, nas datas analisadas, apresentou ruídos, sendo que foi utilizada a banda TM 5. A partir desse índice, foi delimitado o reservatório, de forma a preservar apenas *pixels* puros, para posterior tratamento das imagens. Isso foi necessário para eliminar a mistura presente nos *pixels* de borda, que apresentam variações com o nível da lâmina de água do reservatório. A partir da delimitação da borda, a área do reservatório pode ser recortada nas imagens.

$$NDWI_1 = \frac{Green(CCD2) - NIR(CCD4)}{Green(CCD2) + NIR(CCD4)} \quad (3.10)$$

$$NDWI_2 = \frac{Green(TM 2) - MIR(TM 5)}{Green(TM 2) + MIR(TM 5)} \quad (3.11)$$

### 3.2.2 - Modelo Numérico do Terreno

Para a elaboração dos mapas dos compartimentos aquáticos em função das imagens de sensoriamento remoto e das variáveis limnológicas e o mapa batimétrico foi utilizado o Modelo Numérico do Terreno (MNT) do *software* SPRING.

As imagens de reflectância CCD e TM foram convertidas em modelo numérico do terreno, com a importação das imagens como entidade na forma de grade. Para a geração dos mapas temáticos, foram criadas as classes de reflectância e o fatiamento das bandas.

O mapa com dados topográficos disponibilizado pela SURCEN/CORSAN foi importado para *software* SPRING. Assim mesmo, algumas informações vetoriais precisaram ser digitalizadas. As curvas de nível foram interpoladas gerando grades retangulares que, sucessivamente, foram fatiadas, tendo como produto o mapa batimétrico do reservatório.

Os dados limnológicos foram inseridos no banco de dados geográfico com base nas coordenadas adquiridas em trabalho de campo com o uso do GPS. Cada ponto amostral (x, y) constituiu um valor para Z no MNT. Cada data de coleta de uma variável limnológica representou a criação de um plano de informação. Esses pontos foram interpolados (média ponderada) gerando uma grade retangular e uma imagem em níveis de cinza. A média ponderada considera o valor de cota e de seus oito vizinhos mais próximos a esse ponto, porém atribuem-se pesos variados para cada ponto amostrado em função de sua distância, produzindo dados com processamento menor.

Os valores do fatiamento para a geração de uma imagem temática a partir de uma grade retangular foi definida com a verificação prévia dos dados limnológicos. Considerou-se diferentes intervalos para as variáveis limnológicas: transparência (10 cm), TSS, SOS e SIS (0,5 mg/L) e Chl (1 µg/L). Esses intervalos demonstraram uma melhor definição de compartimentos aquáticos.

### **3.2.3 - Integração dos dados**

Os mapas provenientes do fatiamento dos dados limnológicos e do fatiamento das imagens de satélite foram cruzados utilizando-se a programação em Linguagem Espaço-Algébica (LEGal). A banda do azul foi cruzada com a transparência; a banda verde foi cruzada com os dados de clorofila e a banda vermelha com os dados de TSS. Esse procedimento foi adotado para verificar a relação entre os compartimentos aquáticos encontrados nas imagens de satélite e nos dados de campo. Assim, também, a análise por correlação e a regressão entre os dados limnológicos e espectrais foram realizadas. Nesse sentido, considerando as características das SBs e do reservatório foi realizada a síntese dos compartimentos aquáticos.

*Kennst du das land, wo die zitronen blü'hn*

*Im dunkeln laub die gold-oragen glühn?*

*Kennst du es wohl? – Dahin, dahin!*

*Mocht ich...ziehn.*

**Goethe**

---

## 4. – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 - Características do reservatório e o ano hidrológico

O reservatório foi construído em 1969 e alteado em 2 metros em 1971 (Cruz, 1996), com uma superfície alagada de 68 hectares. Para atender o aumento da demanda de água da cidade de Santa Maria, em 28 de abril de 1999 foi construído um novo dique a jusante. Com essa ampliação o reservatório passou a abranger uma lâmina de água de 275 hectares. A ampliação do reservatório repercutiu em mudanças na profundidade, na formação de novas reentrâncias e ilhas, na inundação do antigo dique e no afogamento de vegetação. Nesse contexto, as condições limnológicas podem definir diferentes compartimentos aquáticos no reservatório.

Apesar de ter sido submerso, o antigo dique não foi removido devido o alto custo econômico e ambiental. Assim sendo, ali havia um ecossistema aquático bastante desenvolvido e equilibrado, e, com a inundação sem remoção do dique, era esperado o surgimento de um novo sistema com o mínimo de impacto possível<sup>6</sup>. A Figura 4.1 apresenta informações batimétricas do reservatório, a área de ocorrência do primeiro reservatório e a localização dos pontos amostrais.

A principal área contribuinte na formação do novo reservatório localiza-se a jusante do antigo dique com profundidades superiores a 30 metros. Com isso, essa pode ser considerada uma área em potencial na formação de um compartimento aquático.

---

<sup>6</sup> Informações verbais obtidas junto ao Eng<sup>o</sup> Civil Sérgio Antônio Martini /SURCEN/CORSAN.(27 de março de 2007)

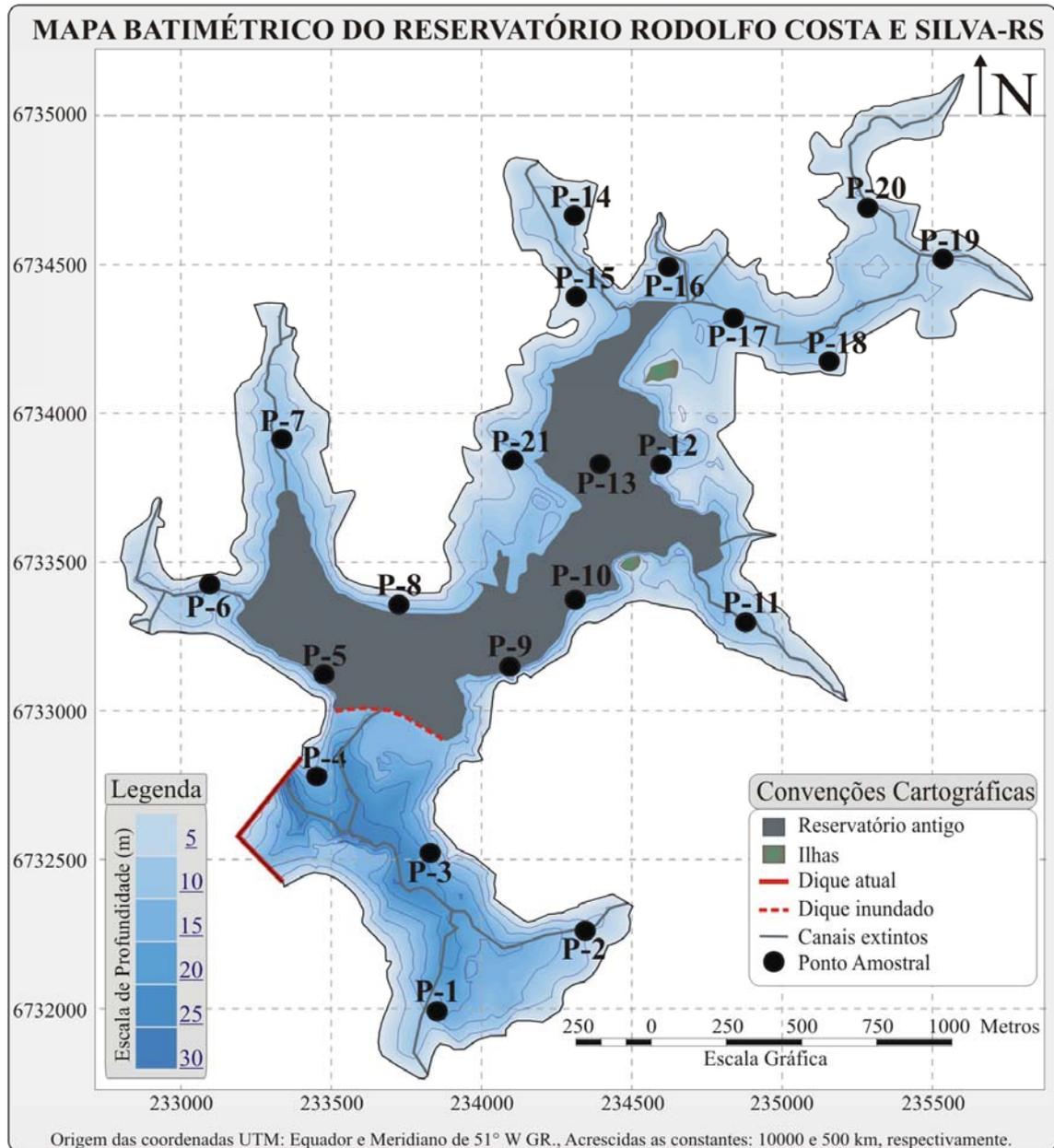


Figura 4.1 - Mapa batimétrico do reservatório Rodolfo Costa e Silva – RS, indicação do reservatório antigo e localização dos pontos amostrais.

A área com a maior deterioração ambiental está localizada a montante do antigo reservatório, que compreende os pontos amostrais entre 14 a 20 com profundidades inferiores a 12 m. Encontram-se, no local, os paliteiros<sup>7</sup>, que se decompõem continuamente e mais intensamente na fase inicial do reservatório. As condições hidrodinâmicas proporcionadas pelos paliteiros e a maior disponibilidade de matéria orgânica permitem o aparecimento e o desenvolvimento de macrófitas associadas a esses compartimentos aquáticos.

<sup>7</sup> São restos de árvores que não foram removidas e estão submersas parcialmente pelas águas do reservatório e encontra-se em processo de decomposição.

Os pontos amostrais situados nos compartimentos aquáticos preliminares localizados nos setores montante, intermediário e jusante possuem as maiores profundidades. A maior profundidade é observada para o P-5 (21 m). Por outro lado, os pontos amostrais localizados nas reentrâncias (setor marginal) apresentam as menores profundidades e, assim, são os mais susceptíveis a serem influenciados pelo material de fundo e pela diferença de nível da água do reservatório durante o ano (Figura 4.2). Esses locais, normalmente, encontram-se abrigados dos efeitos do vento e fora do eixo principal do reservatório, proporcionando um processo hidrodinâmico menor do que outros setores do reservatório, cujo resultado é maior tempo de residência das águas e maior interação com o entorno (Assireu et al., 2007).

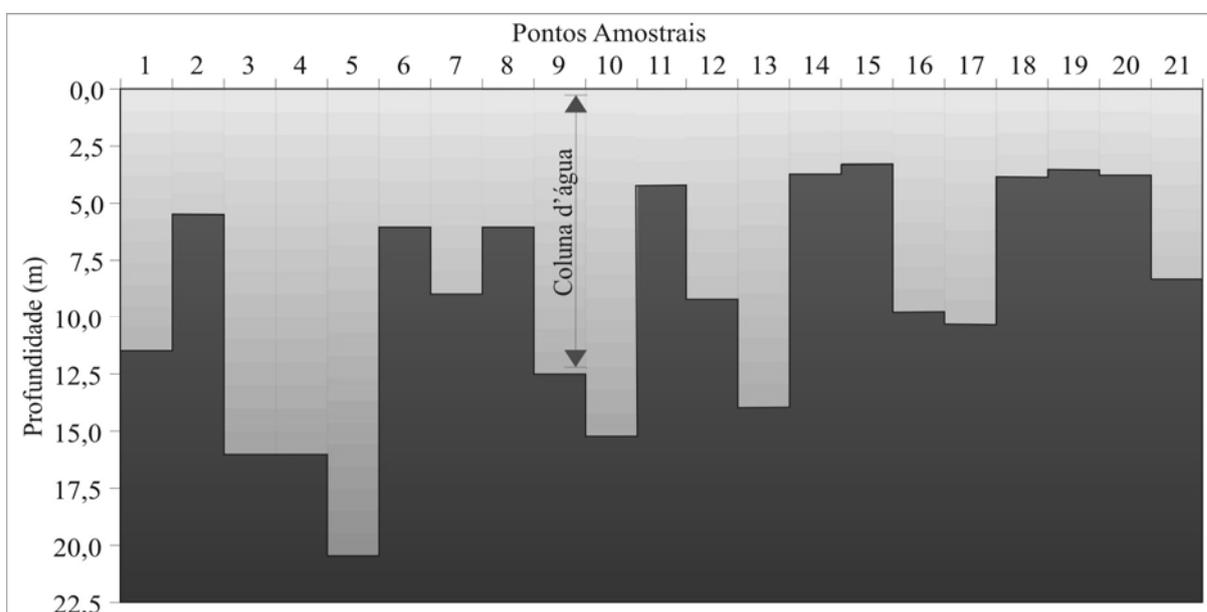


Figura 4.2 - Variação da profundidade nos pontos amostrais.

Fonte: Trabalho de campo

As ilhas também são obstáculos aos processos hidrodinâmicos no reservatório. As duas ilhas localizadas no compartimento aquático intermediário podem interferir nas dinâmicas de circulação da água dos P-10, P-11, P-12 e P-13.

A variação da cota desse reservatório está relacionada, principalmente, à pluviosidade e ao abastecimento urbano. O maior nível do reservatório é observado na primavera (Figura 4.3), período de maiores precipitações. Portanto, o regime das precipitações pode proporcionar duas situações: de maiores níveis, com variáveis limnológicas sob influência dominante das condições externas do reservatório; e os menores níveis da superfície aquática, com variáveis limnológicas mais dependentes das condições internas do reservatório. O maior volume de água utilizado para o abastecimento urbano coincide com o verão e períodos de

menores precipitações, quando o consumo da água, a partir deste reservatório, passa a ser ainda mais intenso em função da redução da disponibilidade hídrica do reservatório DNOS.

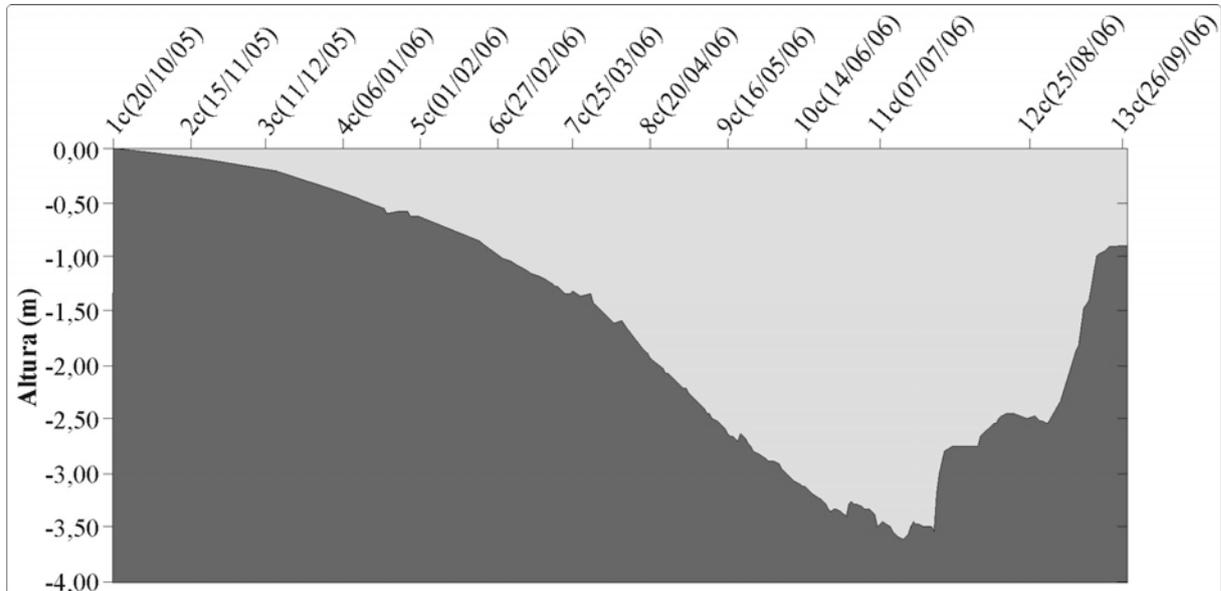


Figura 4.3 - Variação de nível da água do Reservatório durante o ano hidrológico

Fonte: SURCEN/CORSAN, 2007.

#### 4.1.1 - Macrófitas aquáticas

As macrófitas aquáticas que ocorrem no reservatório localizam-se, principalmente, nas reentrâncias, onde as profundidades são menores e a disponibilidade de nutrientes é maior. A espécie encontrada é a *Ludwigia peploide*. Destaca-se que o seu desenvolvimento e aparecimento apresentam variações ao longo do tempo, dependendo da disponibilidade de nutrientes e das condições meteorológicas.

No ano hidrológico estudado, registrou-se, nos trabalhos de campo de 1c(20/10/2005) a 6c(16/05/2006), a presença de macrófitas aquáticas localizadas nas reentrâncias no setor montante do reservatório. A presença de macrófitas aquáticas esteve associada à presença de paliteiros e a profundidades inferiores a 5 metros (nascentes). Esses locais apresentam maior presença de nutrientes e disponibilidade de luz (fundo) necessárias para seu desenvolvimento.

O ciclo das macrófitas aquáticas foi observado em seis estágios de desenvolvimento: desenvolvimento vegetativo, de outubro a dezembro; floração, em janeiro; fim da floração, em fevereiro; maturidade, em março; senescência, de abril a junho; e desaparecimento, de julho a setembro (Figura 4.4).

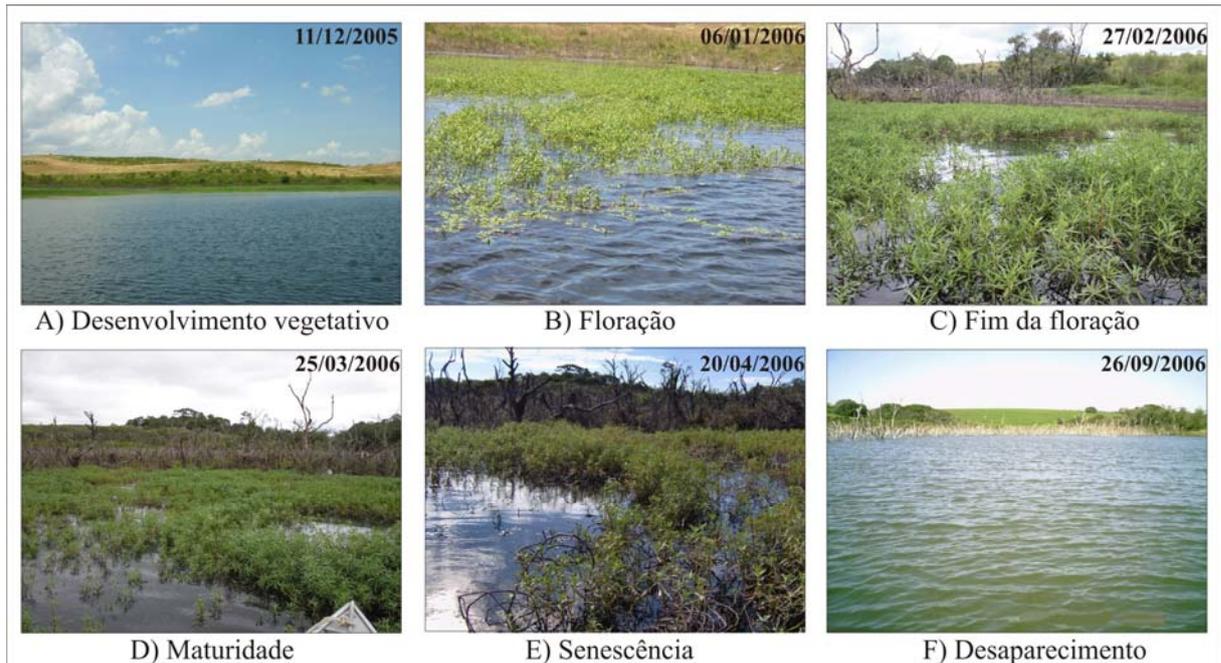


Figura 4.4 - Ciclo das macrófitas aquáticas no CAP 3

Os nutrientes oriundos das sub-bacias são retidos pelas macrófitas aquáticas, do período de desenvolvimento vegetativo até o fim da floração. Com a maturidade essa carga de material é retida em menor quantidade e atinge outras áreas do reservatório. Já a decomposição aumenta a carga de matéria orgânica no sistema. Por fim, as variações na absorção de nutrientes pelas macrófitas aquáticas são refletidas sobre os valores do TSS e, especialmente, de carbono orgânico dissolvido.

#### 4.1.2 - Entorno do reservatório

A bacia hidrográfica participa com a dispersão de nutrientes pela rede de drenagem. O nível de contribuição de cada sub-bacia pode ser indicado através de seus parâmetros morfométricos. Contudo, uma grande influência advém da distribuição quantitativa e espacial dos tipos de uso da terra. As oito sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do reservatório são distintas entre si e isso pode proporcionar diferentes impactos nas variáveis limnológicas.

As maiores áreas de captação estão localizadas no setor montante do reservatório, onde se localiza o principal sistema hídrico representados nas SBs 4 e 5 (Figura 4.5) e, em função disso, um maior volume hídrico pode ser disponibilizado ao sistema aquático. Por outro lado, as sub-bacias localizadas nas margens direita (oeste) e esquerda (leste) do reservatório apresentam as menores áreas de contribuição.

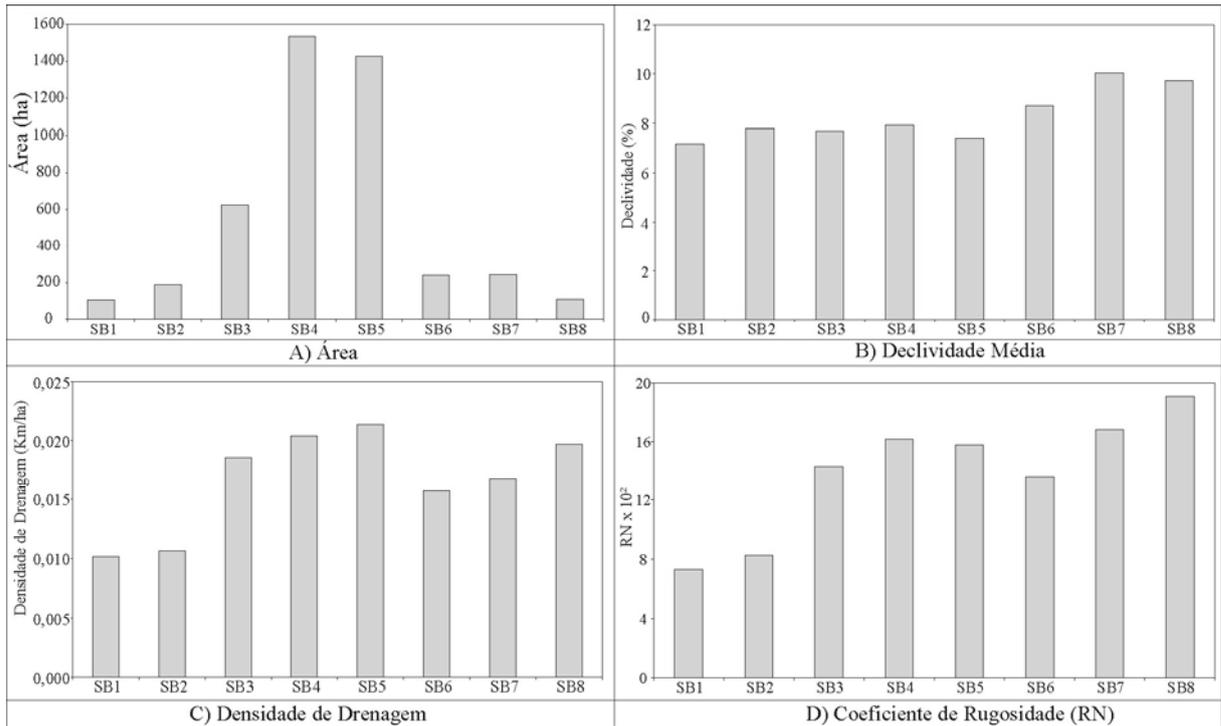


Figura 4.5 - Informações espaciais e morfométricas das SBs do reservatório Rodolfo Costa e Silva

As maiores densidades de drenagens também são encontradas nas SBs 4 e 5 ( $>0,020$  km/ha) (Figura 4.5 (c)). Essa característica indica impermeabilidade dessas áreas de captação que aumenta o escoamento superficial com transporte do solo para o reservatório. A declividade média das SBs é inferior a 10%, caracterizando um relevo plano a ondulado (Figura 4.5 (b)). Essa forma de relevo propicia o desenvolvimento das atividades agrícolas e indica que as SBs apresentam bom potencial de infiltração. Por outro lado, o maior coeficiente de rugosidade mostra que as SBs 4, 5, 7 e 8 são mais susceptíveis aos processos erosivos.

Os tipos de usos da terra da bacia hidrográfica do reservatório são destacados por quatro classes: agricultura, pastagem, floresta e água (Figura 4.6).

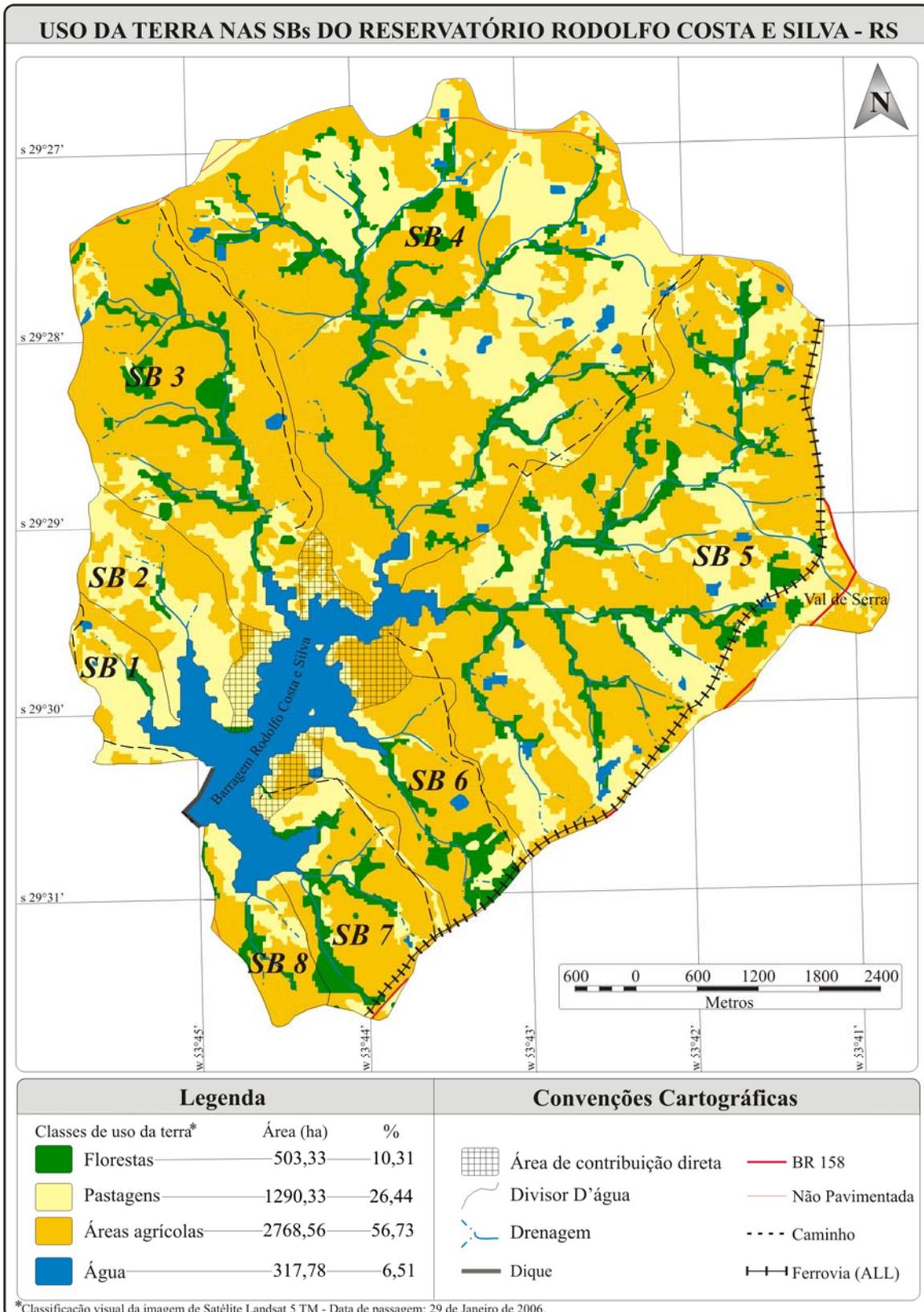


Figura 4.6 - Mapa de uso da terra nas sub-bacias hidrográficas do reservatório Rodolfo Costa e Silva

As áreas agrícolas predominam sobre as demais formas de uso da terra nas SBs 3, 4, 5, 6, 7 e 8 (Figura 4.7) e amplia-se do vale para o topo das colinas. As áreas de campo

localizam-se, principalmente, à margem esquerda do reservatório protegendo essas áreas contra as perdas de solo por erosão pluvial. Nas SBs 4 e 5, o campo também ocorre significativamente, porém está localizado em áreas mais distantes do reservatório. As áreas com florestas estão principalmente associadas à rede de drenagem (áreas de preservação permanente<sup>8</sup>), já fragmentos florestais em outros locais são raros. Quando aparecem, podem pertencer à espécie exótica, especialmente com a presença de *Eucalyptus sp.* Apesar disso, a drenagem e as margens do reservatório, que deveriam estar totalmente protegidas com vegetação, encontram-se ocupadas com áreas agrícolas.

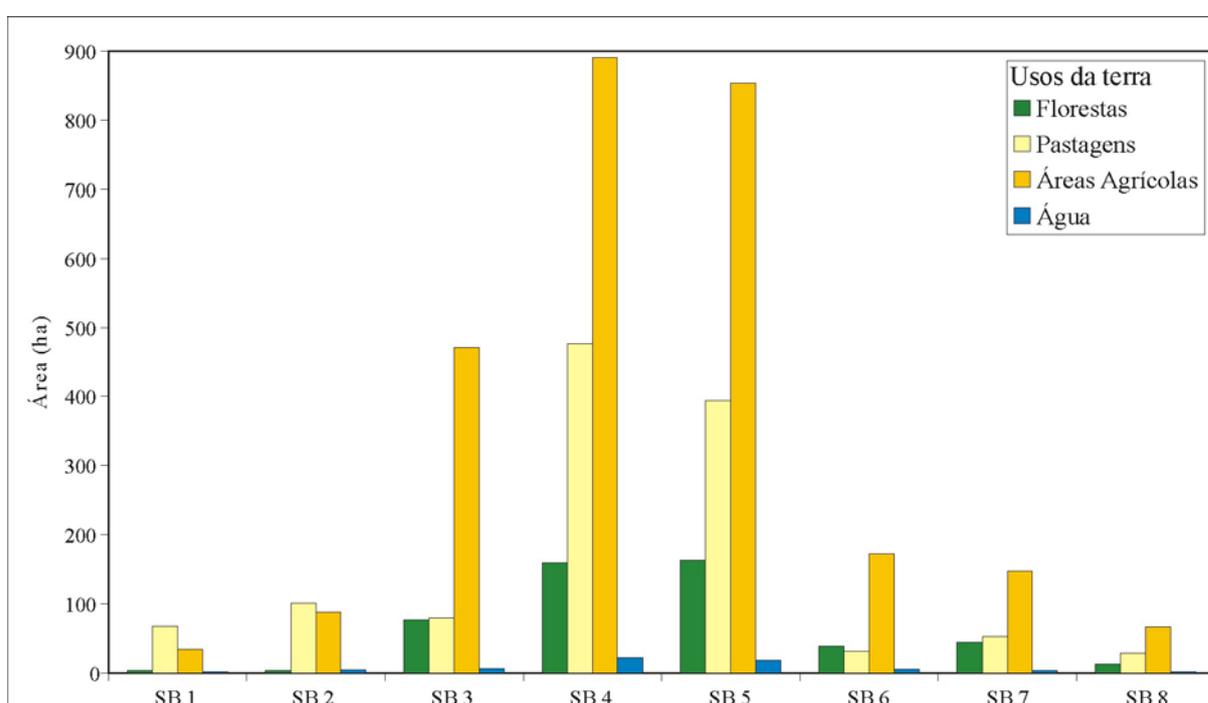


Figura 4.7 - Usos da terra nas Sub-bacias hidrográficas do reservatório Rodolfo Costa e Silva

As áreas agrícolas passam por modificações durante o ano hidrológico. Elas são compostas por quatro fases: solo exposto, com perda de solos vulneráveis e eventuais remoções do solo entre outubro a novembro; ciclo da soja, com as fases de crescimento, desenvolvimento vegetativo e colheita, ocorrendo de dezembro a abril; entressafra, sem a remoção do solo, em maio; e ciclo do trigo e da adubação verde, com ocorrência de junho até setembro. Conseqüentemente, as áreas agrícolas podem interferir significativamente nas águas do setor montante do reservatório, principalmente quando essas áreas encontram-se na

<sup>8</sup> A área de preservação permanente junto a rede de drenagem, segundo a Lei 4771/1965 (Art 2º) é “...de 30 (trinta) metros para os cursos d’água de menos de 10 (dez) metros de largura” e para o reservatório, segundo a Resolução CONAMA 303/2002 (Art 3º), é “...cem metros, para as que estejam em áreas rurais, exceto os corpos d’água com até vinte hectares de superfície, cuja faixa marginal será de cinquenta metros.”

condição de solo exposto (outubro a novembro) e de maiores índices pluviométricos. As perdas de solo proporcionadas por escoamento superficial são desencadeadas e interferem no TSS e no DS, contribuindo para a colmatagem do reservatório.

#### 4.1.3 - Condições atmosféricas

Os índices pluviométricos apresentaram variação durante o ano hidrológico. Os maiores índices reservam-se aos períodos antecedentes aos trabalhos de campo realizados em 1c(20/10/2005) (261 mm), 12c(25/08/2006) (154 mm), 13c(26/09/2006) (168 mm). Índices intermediários foram registrados nas coletas realizadas em 7c(25/03/2006) (101 mm) e 8c(20/04/2006) (121 mm) (Figura 4.8). Nos períodos citados, o escoamento superficial é maior e, com isso, o sistema terrestre pode disponibilizar uma maior carga de materiais para o reservatório. Por outro lado, nas demais datas, com baixos índices de chuva e melhor distribuição à infiltração, esses reduzem o escoamento superficial.

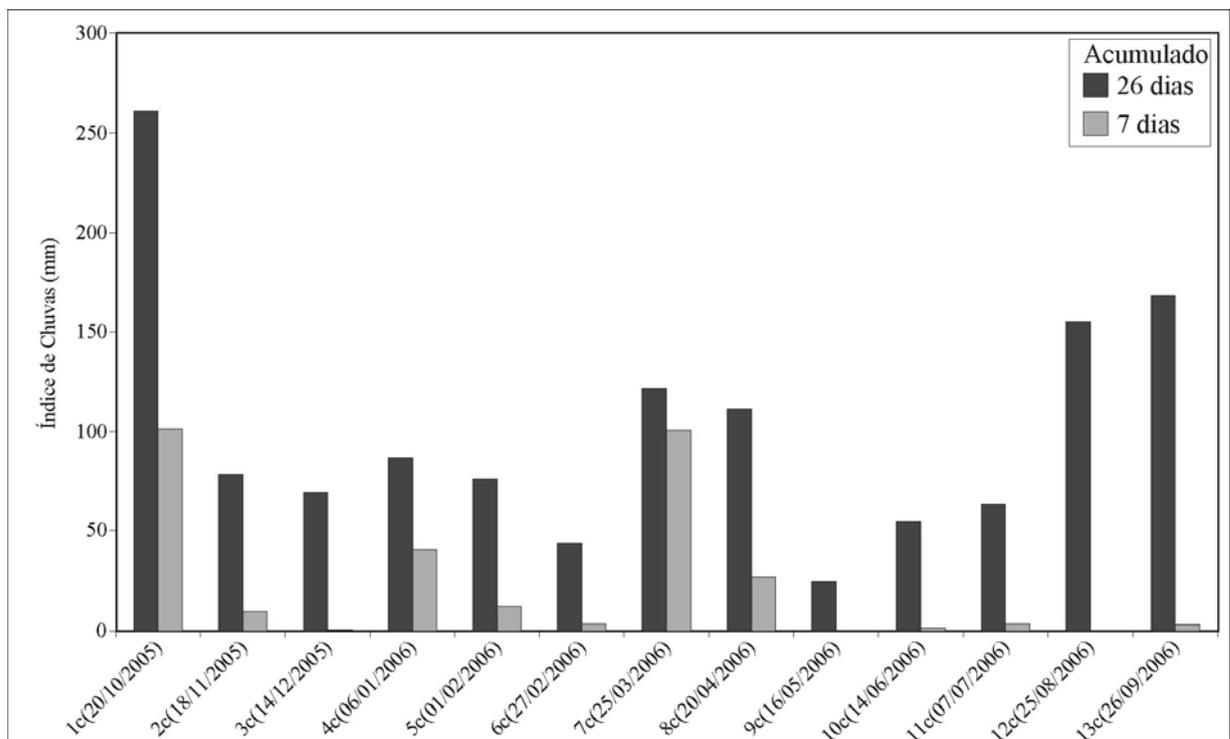


Figura 4.8 - Índices pluviométricos observados no ano hidrológico estudado, correspondente a 26 e 7 dias anteriores à realização dos trabalhos de campo.

Fonte: INPE-CPTEC, 2007.

A concentração de chuvas na semana anterior à coleta das variáveis limnológicas foi baixa. Acredita-se que, somente na 1c(20/10/2005) (101 mm), 4c(06/01/2006) (40 mm),

7c(25/03/2006) (100 mm) e 8c(20/04/2006) (27 mm), as precipitações possam ter aumentado o volume hídrico do reservatório e sido responsáveis a maiores modificações das variáveis limnológicas. Destaca-se que, na 3c(14/12/2005), 9c(16/05/2006), 10c(14/06/2006), 11c(07/07/2006), 12c(25/08/2006) e 13c(26/09/2006) não houve ou foi muito baixa a precipitação pluviométrica na semana antecedente ao trabalho de campo. O período dominante para essa situação corresponde ao inverno, quando foi registrada situação limnológica específica, como transparência e concentração de TSS.

A velocidade do vento a 10 m da superfície, registrada em São Martinho da Serra, destaca as maiores médias no verão. No entanto, os maiores desvios padrões e variâncias são registrados nas datas dos trabalhos de campo 1c(20/10/2005), 2c(18/11/2005), 5c(01/02/2006), 10c(14/06/2006), 11c(07/07/2006) e 12c(25/08/2006) (Tabela 4.1). As variações na velocidade do vento proporcionam diferentes padrões de circulação da água no reservatório e, com isso, interferem nas variáveis limnológicas e na formação de compartimentos aquáticos.

Tabela 4.1 - Estatísticas descritivas dos dados de vento a 10 metros da superfície (km/h)

Coleta*	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância
1	4,15	9,79	6,76	1,50	2,25
2	4,29	9,23	6,73	1,42	2,02
3	4,64	9,39	6,84	1,25	1,57
4	4,98	10,31	7,34	1,33	1,76
5	4,53	9,53	7,14	1,46	2,13
6	5,44	9,41	7,39	1,09	1,18
7	4,90	9,40	7,47	1,15	1,32
8	3,28	8,99	6,90	1,35	1,82
9	4,10	9,84	6,93	1,35	1,82
10	3,34	9,66	6,89	1,46	2,14
11	3,81	10,24	7,12	1,78	3,16
12	3,11	9,43	6,44	1,57	2,46
13	4,44	8,76	6,59	1,23	1,51

\*Os dados de vento correspondem à média diária dos 26 dias antes de cada coleta ou ao intervalo de uma data antecedente até a outra.

Fonte: INPE-CPTEC, 2007.

## 4.2 - Características limnológicas do reservatório

A caracterização das variáveis limnológicas permite compreender o estado ambiental do reservatório. Foram analisadas: transparência do disco de Secchi, TSS, SIS, SOS e Clorofila *a*, *b* e *c*. Essas propriedades podem assumir diferentes valores de acordo com as

circunstâncias na qual o reservatório está inserido, permitindo a identificação de compartimentos aquáticos.

#### 4.2.1 - Transparência do disco de Secchi

A transparência da água medida pelo DS apresentou variações na sua distribuição espaço-temporal. As correlações realizadas entre as 13 coletas de dados (78 relacionamentos) mostraram, no entanto, que 64% das relações apresentaram entre si o coeficiente  $r > +0,50$  (Sig  $\geq 0,05$ ). Isso indica que os pontos amostrais apresentam distribuição vertical de transparência semelhante entre as datas. As maiores transparências são encontradas no verão (5c(01/02/2006), quando a DS atinge 315 cm e as menores transparências são encontradas na primavera (1c(20/10/2005)) quando a DS se reduz a 100 cm (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Estatísticas descritivas dos dados da profundidade do disco de Secchi

Coleta	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância
1c(20/10/2005)	100	130	116	10	91
2c(18/11/2005)	143	167	152	7	48
3c(14/12/2005)	208	230	217	6	37
4c(06/01/2006)	190	250	229	16	261
5c(01/02/2006)	210	315	279	32	1051
6c(27/02/2006)	190	270	240	22	478
7c(25/03/2006)	190	270	232	19	369
8c(20/04/2006)	150	300	253	30	918
9c(16/05/2006)	210	281	253	13	178
10c(14/06/2006)	200	315	281	24	565
11c(07/07/2006)	200	315	280	27	717
12c(25/08/2006)	170	190	181	8	69
13c(26/09/2006)	105	150	133	14	188

Fonte: Trabalho de campo

A menor amplitude dos dados foi encontrada em 3c(15/12/2005) e 12c(25/08/2006) em consequência da não precipitação na semana anterior à coleta, enquanto que a maior amplitude foi identificada em 5c(01/02/2006), 8c(20/04/2006), 10c(14/06/2006) e 11c(07/07/2006) quando ocorreram precipitações na semana anterior. A profundidade total, com a diferença da altura da água ao longo do ano, proporciona maiores correlações ( $r \geq +0,52$ , Sig. 0,05) com a transparência na 4c(06/01/2006), 5c(01/02/2006), 6c(27/06/2006), 10c(14/06/2006) e 13c(26/09/2006). Nas áreas mais rasas, os sedimentos são mais susceptíveis à ressuspensão, devido à movimentação da água provocada pela ação do vento.

A maior variância dos dados foi encontrada em 5c(01/02/2006) e 8c(20/04/2006) para os dados de transparência. Nessas datas, verificou-se uma maior variabilidade espacial, indicando um aumento da probabilidade de identificação de compartimentos aquáticos no reservatório. A razão da maior variabilidade espacial pode ser atribuída ao maior volume de precipitações no período de 26 dias e na semana anterior ao campo. Além disso, a redução da profundidade dos pontos amostrais aumentou a possibilidade da remoção dos sedimentos nos locais mais rasos do reservatório (setor montante) pelo vento. Essa condição é principalmente observada em 5c(01/02/2006), quando ocorrem as maiores médias de vento, que impõe a maior circulação da água, resultando na difusão da matéria orgânica e inorgânica contida em zonas pouco profundas (interface terra-água) do reservatório às demais áreas.

Observam-se um aumento na transparência da água, no verão, e manutenção desta, no outono e inverno. Na primavera, são retomadas as condições iniciais de baixas transparências, em função do aumento das precipitações e devido ao período de preparo do solo para a safra de verão (Figura 4.9). Assim, a transparência do reservatório Rodolfo Costa e Silva pode ser dividida temporalmente em duas situações: baixas transparências, compreendendo o período de agosto a novembro; e altas transparências, compreendendo o período de dezembro a junho.

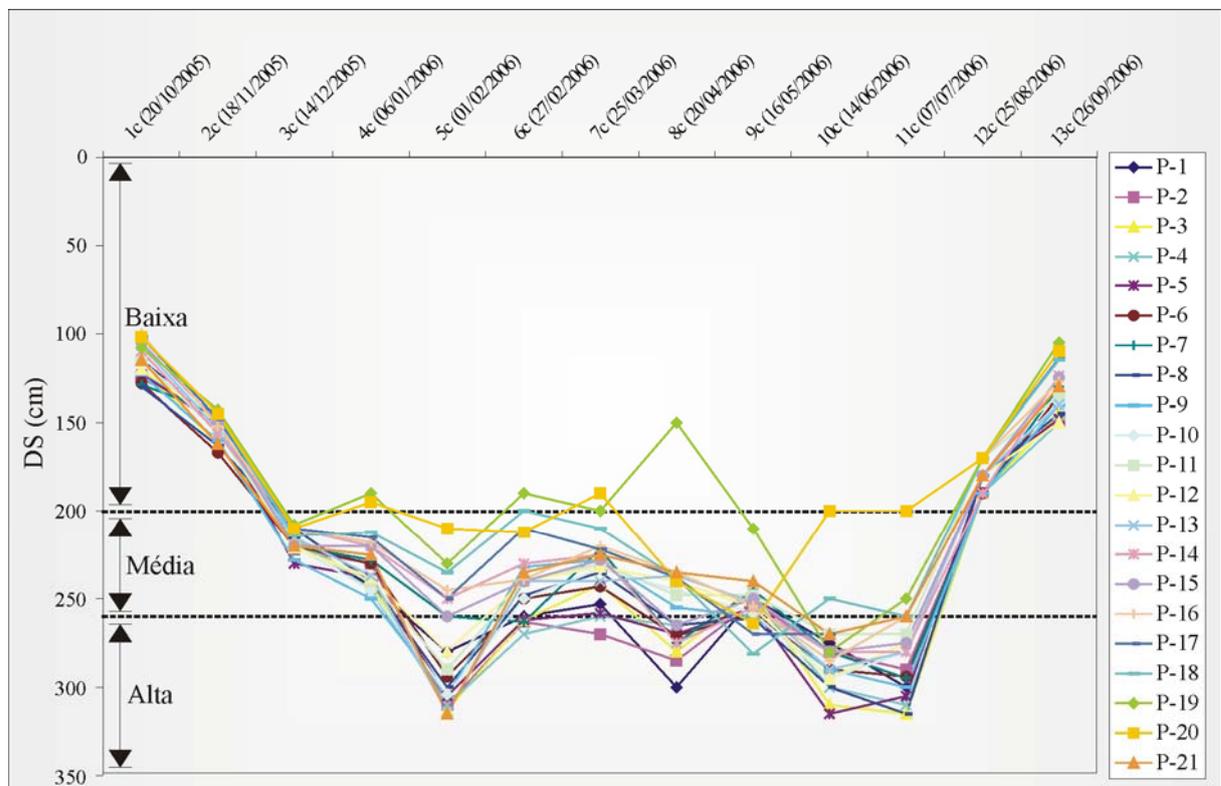


Figura 4.9 - Variação da transparência nos pontos amostrais em função das coletas do Reservatório Rodolfo Costa e Silva

A profundidade do disco de Secchi aumenta até 5c(01/02/2006), quando atinge a média de 279 cm. Ela somente retorna a esse valor em 10c(14/06/2006) e 11c(07/07/2006). A redução da transparência vincula-se, principalmente, a precipitações mais intensas no período anterior à coleta e à participação dos diferentes tipos de uso da terra nas áreas de captação, por meio do qual o escoamento superficial pode estar carregando material para o reservatório. Para 6c(27/02/2006), além dessas situações, a redução da transparência está associada ao maior aporte de matéria orgânica advinda da decomposição de macrófitas aquáticas.

Os maiores índices pluviométricos diminuíram a transparência da água no ano hidrológico (Figura 4.10a). No entanto, verifica-se que as médias transparências são proporcionadas por outros fatores como a liberação de matéria orgânica pelas macrófitas aquáticas. Por outro lado, o vento apresentou relação positiva com disco de Secchi (Figura 4.10b). Esperava-se que o vento, no sentido geral, fosse diminuir a transparência. Destaca-se, em áreas menos profundas, como comentado acima, o vento tem influência na redução da transparência.

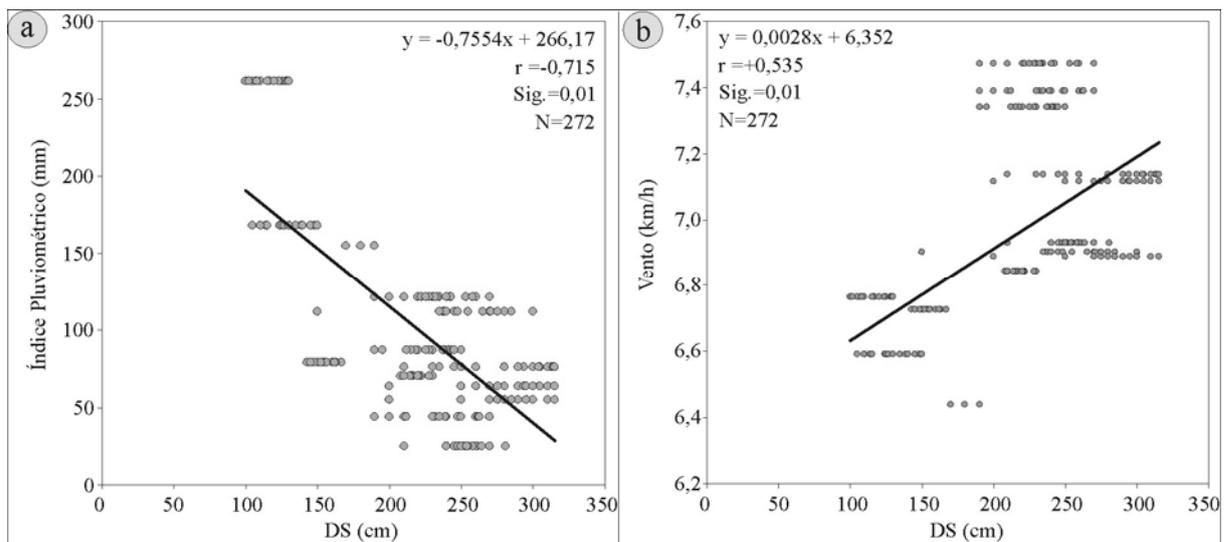


Figura 4.10 - Relação entre as condições atmosféricas e a transparência DS. a) Relação entre a DS e o índice pluviométrico. b) Relação entre a DS e o vento

Os mapas da transparência, conforme apresentado na Figura 4.11, permitem a identificação no mínimo de dois compartimentos aquáticos para todas as datas. O primeiro, localizado no setor montante, com menores transparências; e o segundo, no setor intermediário-jusante, com maiores transparências. A presença de três compartimentos implica na separação do setor intermediário e do setor jusante como ocorre para 8c(20/04/2006), 10c(14/06/2006), 11c(07/07/2006) e 13c(26/09/2006).

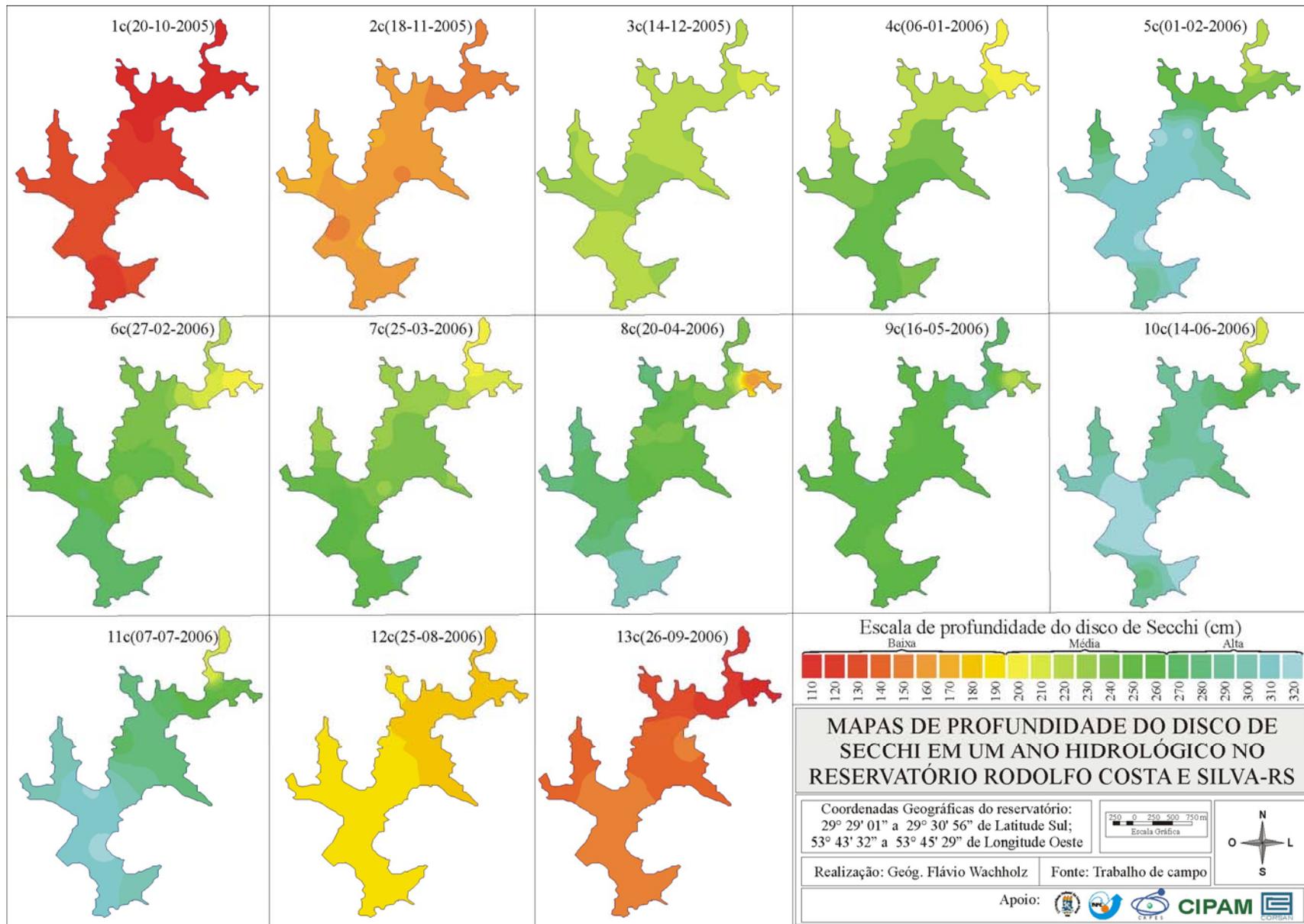


Figura 4.11 - Mapas de profundidade do Disco de Secchi em ano hidrológico no reservatório Rodolfo Costa e Silva - RS

As áreas centrais do reservatório possuem as maiores transparências, devido à deposição da matéria orgânica e inorgânica nas reentrâncias, advindas das nascentes. As reentrâncias localizadas na montante do reservatório podem ser destacadas, pois freqüentemente na área são observadas as menores transparências.

Constatou-se que os pontos 1 e 2 apresentam a mesma transparência do compartimento central do reservatório. Esses pontos demonstram que as características das duas SBs pouco interferem na água, já que a reentrância é a mais profunda do reservatório e a área de captação é relativamente pequena em comparação ao volume de água desses compartimentos. Isso faz com que a concentração dos sedimentos seja diluída conforme Pereira Filho (1990).

A zona fótica pode ser estimada em função da profundidade do disco de Secchi, conforme abordado na fundamentação teórica (Ishii, 1987, citado em Esteves, 1998). Em 50 % dos pontos de coleta, de janeiro a agosto, principalmente aqueles situados nas reentrâncias, a zona fótica atinge toda a coluna da água. Logo, a disponibilidade de nutrientes e a iluminação de toda coluna da água possibilitam o aparecimento e o desenvolvimento de macrófitas aquáticas.

#### **4.2.2 - Totais de Sólidos em Suspensão**

A distribuição do TSS, no contexto espacial e entre as variáveis limnológicas, apresentaram uma grande variação entre as coletas de dados (Tabela 4.3). Os valores mínimos foram encontrados na 5c(01/02/2006) e 11c(07/07/2006), em consonância aos baixos índices pluviométricos e alto índice de cobertura do solo devido à biomassa verde. Os valores máximos de TSS são encontrados na 1c(20/10/2005) e 13c(26/09/2006), período da exposição do solo para o plantio, associado a maiores índices pluviométricos, proporcionando uma maior perda de nutrientes para o reservatório. Diferente da transparência, as correlações entre os dados de TSS das 13 coletas (78 relacionamentos) somente foram significativas ( $r > +0,50$  : Sig.  $\geq 0,05$ ) para 8% dos dados. Além disso, as coletas 3c(14/12/2005) e 6c(27/02/2006) apresentaram entre si uma correlação negativa ( $r = -0,50$ , Sig=0,05). Isso indica que a redução de interferências externas no reservatório produziu diferentes padrões de distribuição de TSS durante o ano hidrológico.

Tabela 4.3 - Estatísticas descritivas dos dados de Totais de Sólidos em Suspensão

<b>Coleta</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Variância</b>
1c(20/10/2005)	5,80	14,16	7,72	1,97	3,87
2c(18/11/2005)	4,79	6,36	5,47	0,62	0,39
3c(14/12/2005)	2,01	3,87	2,95	0,46	0,21
4c(06/01/2006)	4,10	8,64	6,34	1,36	1,84
5c(01/02/2006)	0,00	2,64	1,00	0,80	0,64
6c(27/02/2006)	0,17	3,62	1,69	0,96	0,93
7c(25/03/2006)	3,17	4,92	4,04	0,48	0,23
8c(20/04/2006)	0,62	4,17	1,96	0,82	0,67
9c(16/05/2006)	0,87	2,34	1,54	0,45	0,20
10c(14/06/2006)	0,52	3,52	1,56	0,86	0,74
11c(07/07/2006)	0,00	4,22	1,17	1,06	1,12
12c(25/08/2006)	1,57	7,22	3,74	1,25	1,55
13c(26/09/2006)	6,32	11,67	8,99	1,14	1,31

Fonte: Trabalho de campo

Normalmente, as maiores médias de TSS coincidiram com as maiores variâncias. As altas concentrações de TSS são proporcionadas pela maior contribuição da bacia hidrográfica. As relações do TSS e a profundidade total em 4c(06/01/2006) e 6c(27/02/2006) apresentaram um  $r = -0,56$  ( $\text{Sig} \geq 0,05$ ), ou seja, as maiores concentrações de TSS estão nos afluentes (menores profundidades) e depositam-se em prosseguimento nas maiores profundidades do reservatório (eixo central), conferindo menores concentrações.

Na 1c(20/10/2005), o TSS possui as maiores concentrações; logo, na 2c(18/11/2005) e 3c(14/12/2005), a concentração diminui. O aporte de material particulado reduz-se, na medida em que se aproxima o verão, dada a menor frequência das precipitações (Figura 4.12) e ao início da cobertura do solo, dado o crescimento da vegetação (culturas plantadas). No entanto, com o aumento da zona eufótica e da temperatura, ocorre o crescimento do fitoplâncton e propicia a reprodução do zooplâncton, repercutindo no maior TSS em 4c(06/01/2006). Supõe-se que, para 5c(01/02/2006), as populações fitoplantônica e zooplantônica tenham diminuído, em função do estágio de maturidade de sua fase de desenvolvimento. A 7c(25/03/2006) apresentou aumento nas concentrações em função do grande volume de precipitações na semana anterior à coleta. Para 12c(25/08/2006) e 13c(26/09/2006), a concentração de TSS assume o comportamento das primeiras coletas.

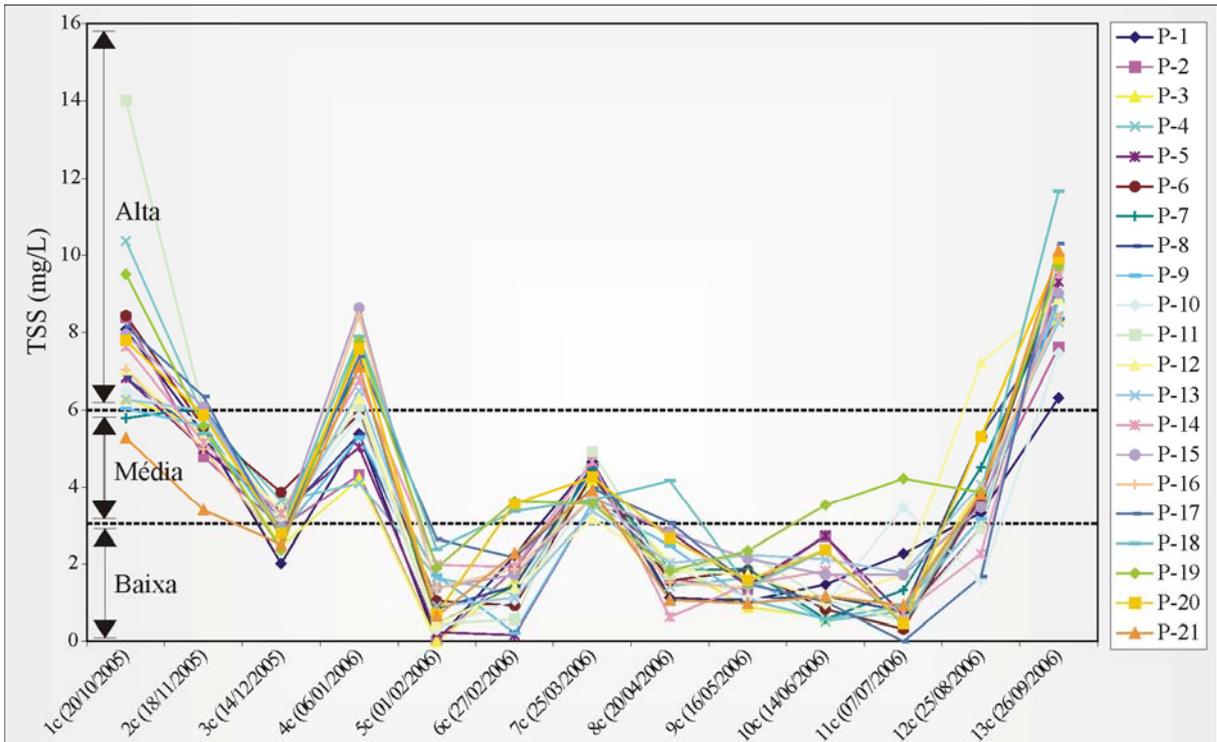


Figura 4.12 - Variação do TSS nos pontos amostrais em função das coletas do Reservatório Rodolfo Costa e Silva

Os maiores índices pluviométricos aumentam a concentração de TSS nas águas do reservatório no ano hidrológico (Figura 4.13a). No entanto, a relação é encontrada em função dos períodos de maiores índices pluviométricos coincidirem com o da preparação do solo para plantio. Por outro lado, o vento apresentou relação negativa com o TSS (Figura 4.13b); ao contrário disso, esperava-se um aumento do TSS com a velocidade do vento.

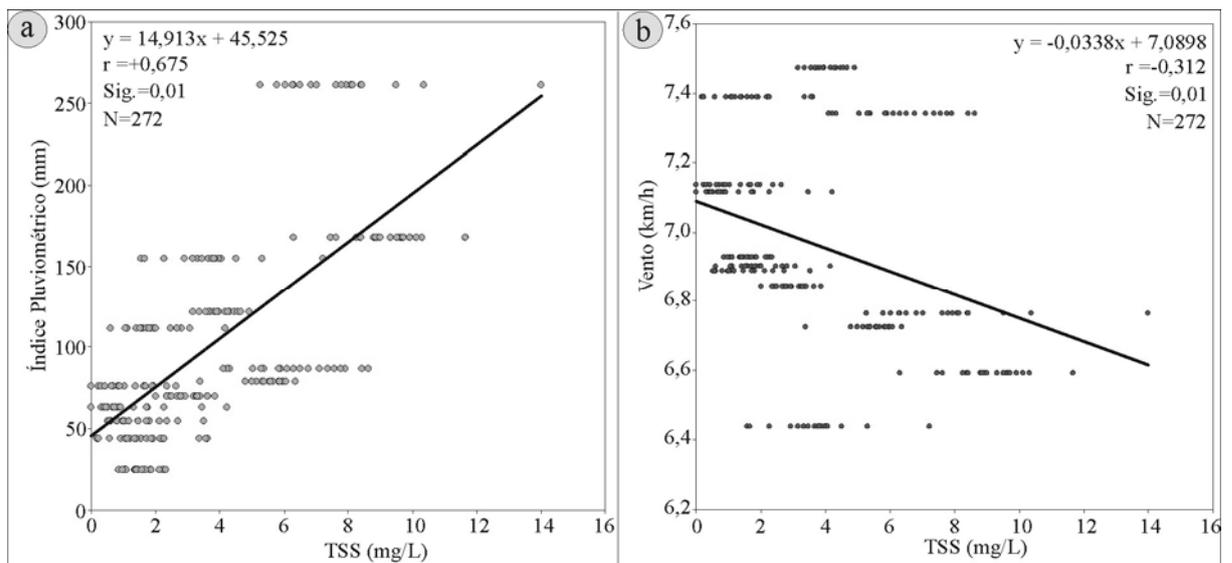


Figura 4.13 - Relação entre as condições atmosféricas e o TSS. a) Relação entre o TSS e o índice pluviométrico. b) Relação entre o TSS e o vento

O TSS forma compartimentos aquáticos semelhantes aos da transparência. Os maiores valores de TSS durante o ano, em geral, são encontrados no setor montante do reservatório e, em algumas vezes, são encontrados próximo ao dique (Figura 4.14). No setor montante, os maiores valores são encontrados, em função da maior entrada de matéria orgânica e inorgânica advinda das SBs. Esse material deposita-se à medida que se aproxima do dique, proporcionando compartimento aquático com menores concentrações. Por outro lado, no dique, acredita-se que a ressurgência apresentada pelo antigo dique seja norteadora do aumento dessa variável em relação ao setor intermediário. Essa situação pode ser verificada principalmente na 1c(20/10/2005), 2c(18/11/2005) e 6c(27/02/2006).

Ao encontrar dois compartimentos com distribuição espacial semelhante para o DS e TSS, foi possível verificar a correlação negativa que existe entre estes dois parâmetros, concordando com as colocações apresentadas por Kirk (1994) e Esteves (1998).

Com a identificação do SOS e SIS em 9c(16/05/2006) e 13c(26/09/2006), verificou-se que o SOS tem maior participação sobre o TSS (Tabela 4.4). Conclui-se que as altas transparências possibilitam a penetração da luz favorecendo o desenvolvimento de fitoplâncton (Esteves, 1998), que se presume em fração orgânica.

Tabela 4.4 - Estatísticas descritivas dos dados do TSS, SOS e SIS

Variável	Coleta	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância
TSS	9	0,96	2,04	1,39	0,25	0,06
	13	3,57	6,13	4,46	0,62	0,38
SOS	9	0,83	1,22	0,98	0,10	0,01
	13	2,20	3,28	2,80	0,28	0,08
SIS	9	0,01	1,18	0,41	0,23	0,06
	13	1,10	3,40	1,67	0,58	0,34

Fonte: Trabalho de campo

As participações dos SIS e SOS variaram em função da concentração do TSS. Nesse sentido, na 9c(16/05/2006), o SIS participa em média com 27 % do total do TSS; já, para 13c(26/06/2006), esse valor é mais de 36 %. Verifica-se, também, que essa variável apresenta a maior amplitude e, conseqüentemente, os maiores desvio padrão e variância. Resultado esse, vinculado à recepção da maior quantidade de nutrientes das bacias hidrográficas da montante do reservatório e da deposição local. Na 13c(26/06/2006), essa situação possibilita verificar que o aumento das precipitações e a maior presença de solo exposto nas SBs provocaram uma maior concentração de TSS no reservatório (Figura 4.15).

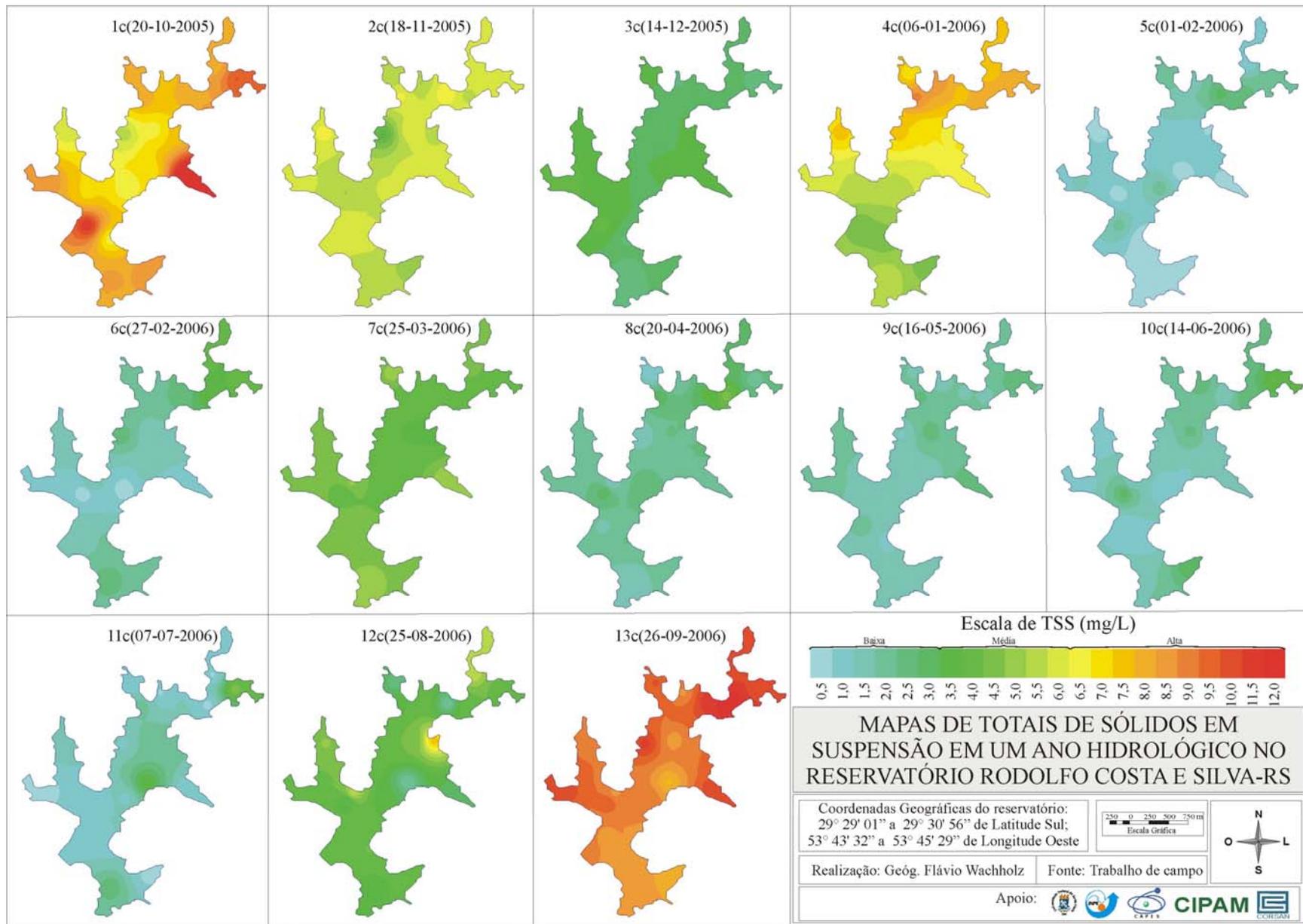


Figura 4.14 - Mapas de Totais de Sólidos em Suspensão em ano hidrológico no reservatório Rodolfo Costa e Silva - RS

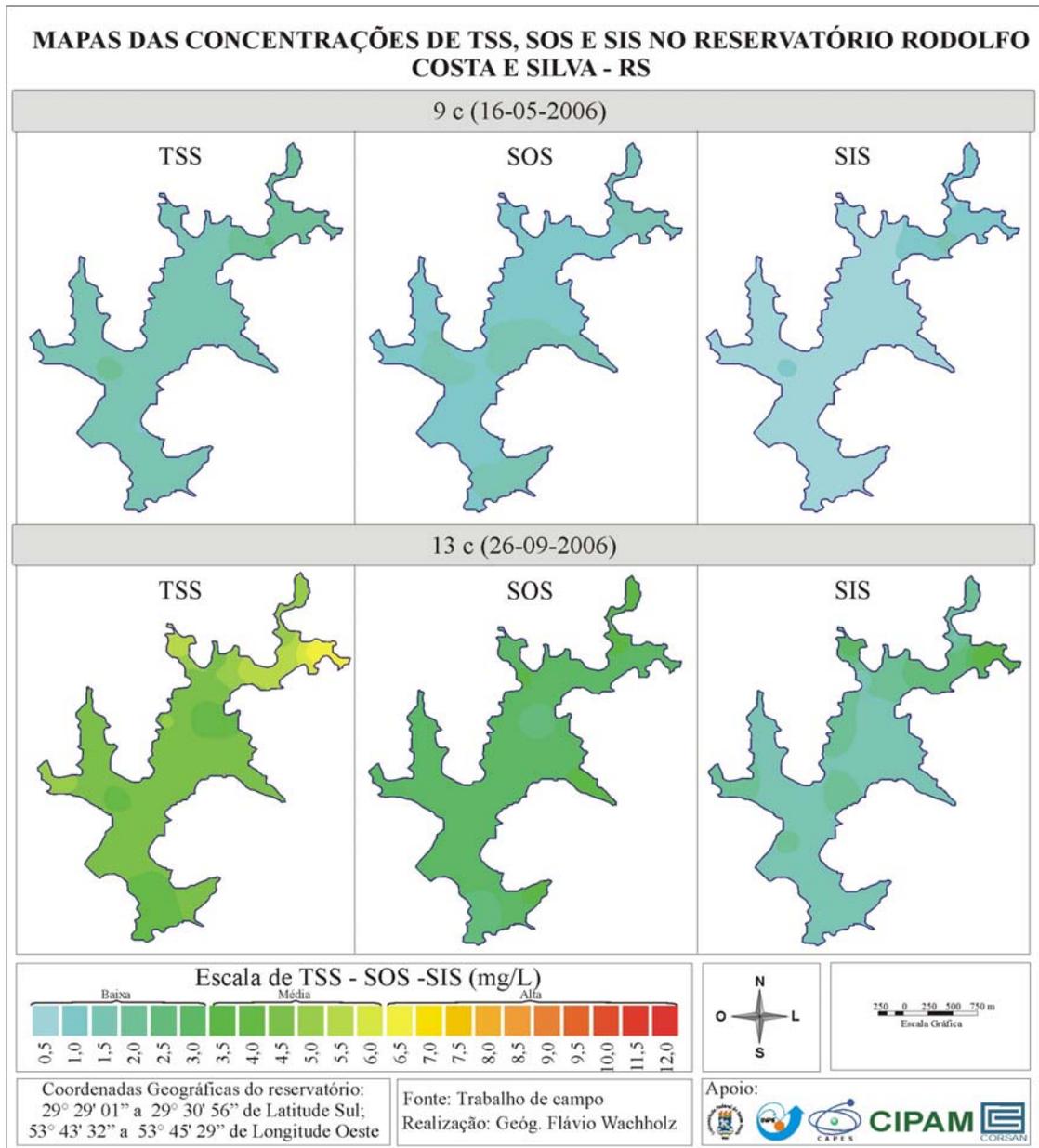


Figura 4.15 - Mapas de TSS, SOS e SIS no reservatório Rodolfo Costa e Silva - RS

A variável SOS, com maior média, foi observada na 13c(26/06/2006). Esse valor está relacionado à maior presença de fitoplâncton no setor montante do reservatório, conforme será visto na seção 4.2.3. Provavelmente, esteja relacionado a uma maior disponibilidade de nutrientes, advindos do entorno terrestre e às menores profundidades nesses locais, possibilitando o crescimento do fitoplâncton e de macrófitas aquáticas.

#### 4.2.3 - Clorofila *a*, *b* e *c*

A clorofila *a* é um pigmento comum a todos os tipos de algas e é indicador da presença de populações fitoplanctônicas (Londe et al., 2005). Ela se confirmou para o

reservatório Rodolfo Costa e Silva, com as maiores concentrações, desvio padrão e variâncias (Tabela 4.5). No entanto, a concentração média da clorofila *a* encontrada no reservatório é pouco maior na 9c(16/05/2006).

Tabela 4.5 - Estatísticas descritivas dos dados das Chl *a*, *b* e *c*

Chl	Coleta	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variância
<i>a</i>	8	0,53	16,14	7,67	5,44	29,59
	9	1,72	17,19	7,93	5,57	31,05
<i>b</i>	8	0,54	24,19	3,66	5,10	26,04
	9	0,43	6,65	2,12	1,76	3,09
<i>c</i>	8	0,00	9,99	2,70	2,41	5,80
	9	0,55	9,74	3,13	2,62	6,89

Fonte: Trabalho de campo

A variabilidade espacial da Chl *a* mostrou a presença de três compartimentos aquáticos: o primeiro localizado na nascente; o segundo, intermediário; e o terceiro, a jusante (Figura 4.16). Sendo que, para a 8C(20/04/2006) a maior concentração foi encontrada na nascente, apresentando uma gradativa diminuição à medida que se aproxima da jusante. Na 9C (16/05/2006), as concentrações intermediárias foram encontradas no setor montante. Essas diferenças na concentração podem estar relacionadas ao menor volume de chuvas ocorridas no segundo período e ao regime de circulação da água em direção a jusante em associação aos dias mais ventosos no período que podem ter deslocado o fitoplâncton.

As Chl *b* e *c* apresentam concentrações baixas e médias e variâncias menores do que Chl *a*. Nesse sentido, o reservatório apresenta dois compartimentos aquáticos: o primeiro, de menor concentração de Chl *b* e *c* com localização no setor jusante; o segundo, de maior concentração, que abrange os setores intermediário e montante do reservatório.

A maior concentração de nutrientes ocorre no setor montante e diminui quando se aproxima do setor jusante do reservatório. Segundo Thornton et al. (1990), esse resultado implica numa distribuição com concentrações inversamente proporcionais do fitoplâncton, visto que, no setor jusante, estão as maiores transparências (disponibilidade de luz). Destaca-se, porém, que o reservatório apresenta, mesmo no setor montante, transparências sempre superiores a 1 m, que, associada à maior disponibilidade de nutrientes, proporcionam uma maior produção primária.

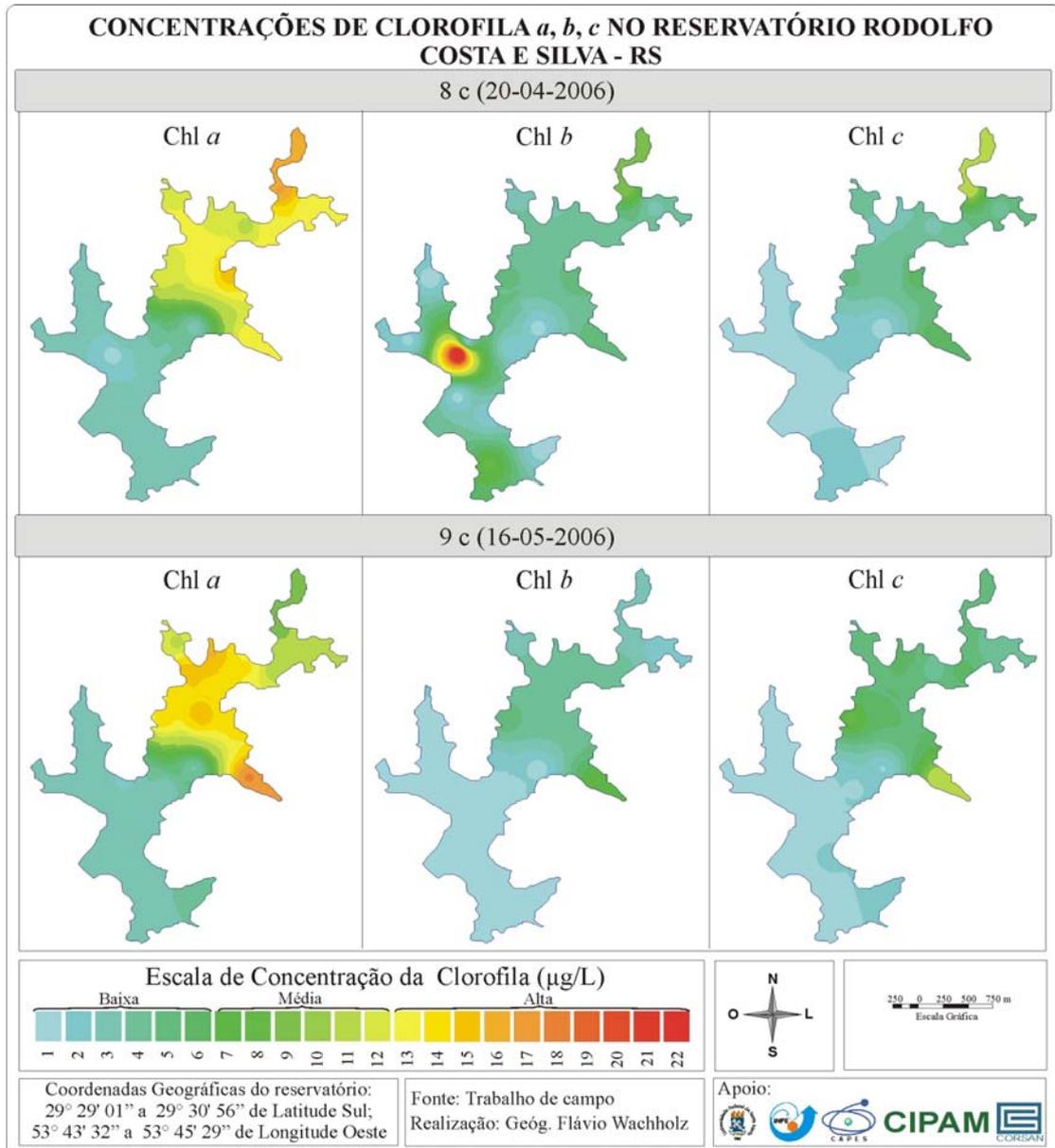


Figura 4.16. - Variação espacial da concentração de clorofila no reservatório Rodolfo Costa e Silva

#### 4.2.4 - Dados radiométricos

A forma dos espectros da água fornece indicativos de quais componentes opticamente ativos estão dominando o espectro. A Figura 4.17 ilustra os espectros de reflectância bidirecional obtidos nos 21 pontos amostrais. Todos eles apresentam maior reflectância bidirecional na faixa espectral referente ao verde, onde a clorofila é o principal componente que influencia no processo de espalhamento (Kirk, 1994). No comprimento de onda do azul, as clorofilas *a*, *b* e *c* participam na absorção da radiação eletromagnética, mas sem apresentarem feições de absorção específica. No comprimento de onda do vermelho, duas feições de absorção são observadas: 630 nm, relacionada à Chl *c*; e 675 nm, relacionada à Chl *a*.

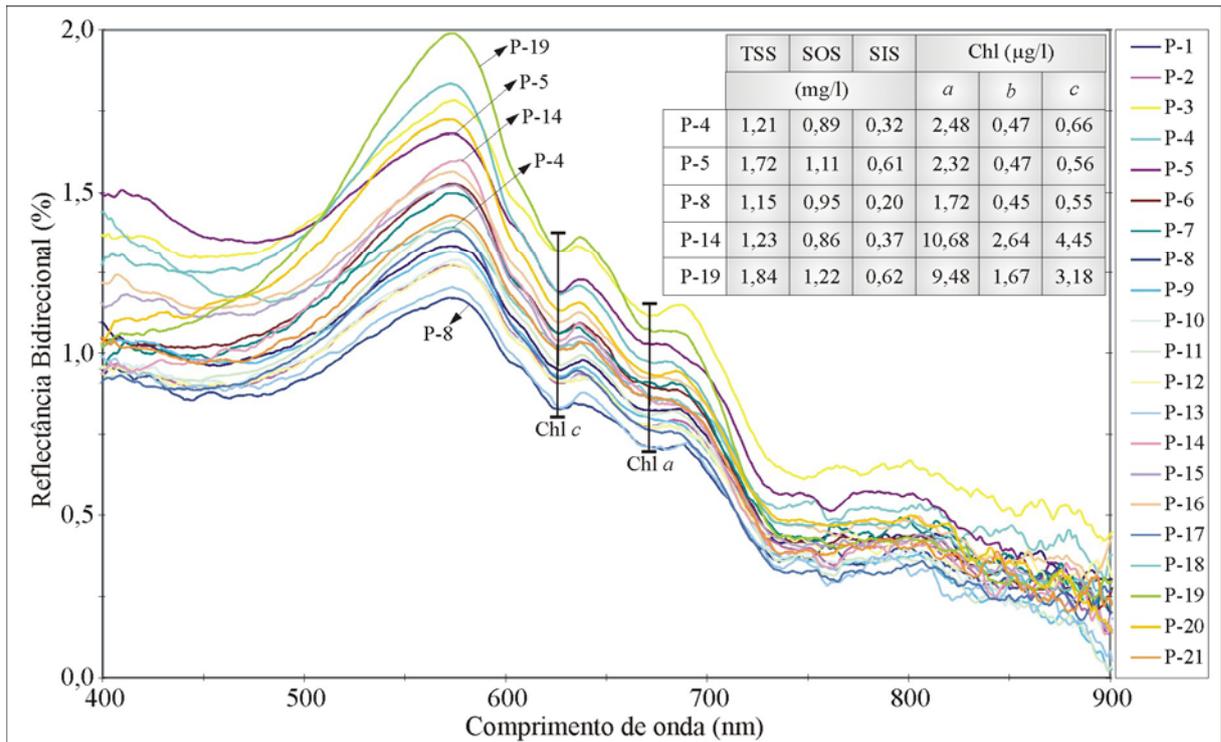


Figura 4.17 - Espectros de reflectância bidirecional em 9c(16/05/2006)

O espalhamento da radiação eletromagnética causado pelas clorofilas ocorre em comprimentos de onda do verde com as maiores reflectâncias no espectro, cujo ápice está em torno de 575 nm. Com muito menor intensidade, as clorofilas agem no espalhamento da radiação no infravermelho próximo, principalmente em comprimentos de onda próximos a 800 nm, com a manutenção da reflectância.

Apesar dos dados terem sido filtrados por média móvel, às vezes, os ruídos se sobressaem. Isso sugere que a variabilidade nos espectros dos diferentes pontos pode estar relacionada à precisão das medidas radiométricas e à influência atmosférica. Os ruídos também aparecem na faixa do infravermelho próximo (750 a 900 nm) e estão relacionados às baixas concentrações de SIS que pouco contribuíram no processo de espalhamento da radiação eletromagnética.

Os pontos 4, 5, 8, 14 e 19 revelam algumas características espectrais importantes. As menores concentrações de TSS e clorofilas resultaram em menor albedo para as amostras 4 e 8. Por outro lado, maiores concentrações de TSS e clorofilas implicaram em maior albedo dos pontos 14 e 19. Destaca-se que a alta concentração de Chl *a* é o principal fator para esse comportamento espectral, já que, na faixa do azul e do vermelho, a reflectância é menor, considerando alguns pontos. Outra característica observada para o ponto 14, apesar de possuir um pouco mais de concentração de clorofilas, possui reflectância menor e, na faixa do azul

apresenta uma redução dada à provável influência da matéria orgânica dissolvida. O ponto 5, na faixa azul, apresenta a adição da radiação do céu no espectro da água.

A baixa variabilidade e concentração dos componentes opticamente ativos resultaram em baixa reflectância. Devido à semelhança dos espectros de reflectância adquiridos no reservatório, Breunig et al. (2007) utilizaram a técnica de remoção do contínuo<sup>9</sup> para realçar as bandas de absorção, especialmente relacionadas à presença de clorofila na água, pois essas são, normalmente, proporcionais à sua concentração (Kirk, 1994). No entanto, as correlações entre os parâmetros do contínuo e os dados limnológicos (DS, TSS e Chl) não foram significativos.

A razão de bandas dos picos de reflectância e banda de absorção dos pigmentos apresentaram relações mais significativas. Denota-se a isso uma relação entre a concentração de clorofila a e c com a quantidade de radiação absorvida e espalhada em determinadas regiões do espectro eletromagnético (Figura 4.18).

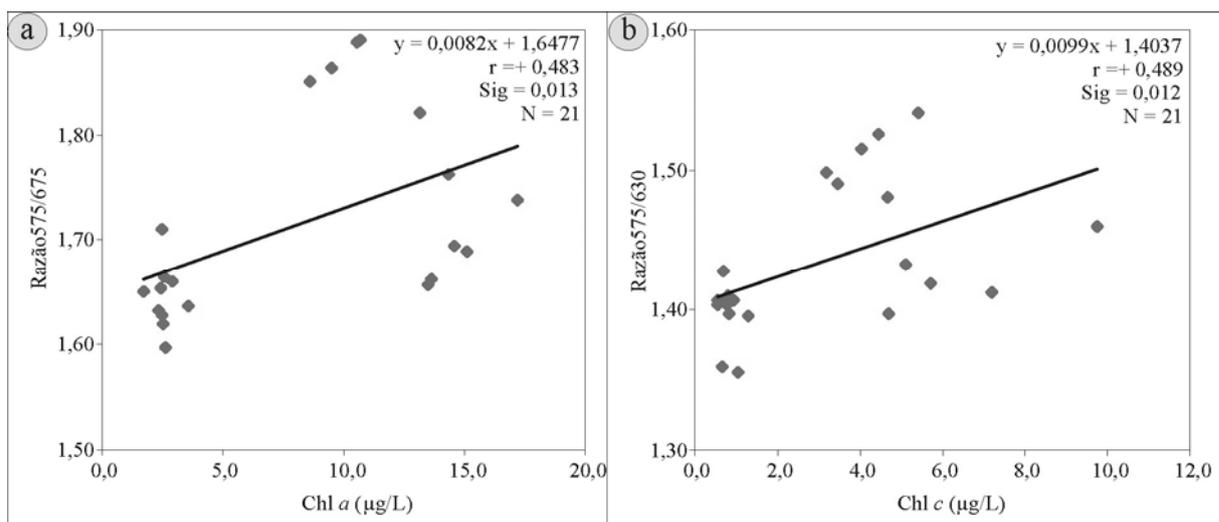


Figura 4.18 - Relação entre as clorofilas e a razão de bandas. a) Relação entre Chl a e a razão 575 (Pico de reflectância)/675 (Banda de absorção da Chl a). b) Relação entre Chl c e a razão 575 (Pico de reflectância)/630 (Banda de absorção da Chl c)

A dispersão mostra, nas duas situações, dois grupos: das baixas concentrações de clorofila e das altas concentrações de clorofila que no aspecto conjunto, apresenta relação,

<sup>9</sup> A técnica de remoção do contínuo foi proposta por Clark e Roush (1984) e consiste em remover as feições contínuas dos espectros. O contínuo é representado por uma função matemática utilizada para isolar bandas de absorção particulares dos espectros de reflectância, além de acentuar as feições (Mutanga e Skidmore, 2003). Em última instância, consiste numa normalização de dados espectrais que permite reduzir os efeitos externos (Meer, 2000; Clark e Roush, 1984).

mas, se isolado algum grupo, essa não ocorre. Isso indica que os dados de espectroradiometria de campo conseguiram detectar variações superiores a 4  $\mu\text{g/L}$  de concentração de Chl *a*.

### **4.3 - Compartimentos aquáticos encontrados nas imagens de sensoriamento remoto**

Os compartimentos aquáticos encontrados na banda azul das imagens de sensoriamento remoto foram relacionados com a transparência do disco de Secchi. Nesse sentido, esperava-se que as regiões de maior transparência apresentassem uma maior transmitância da radiação eletromagnética, logo tenham uma menor radiância recebida pelo sensor (Novo, 2001).

As maiores transparências proporcionam baixas reflectâncias e as baixas variâncias implicam na definição de um único compartimento aquático no reservatório. Maiores transparências e baixas reflectâncias são observadas em 6c(27/02/2006), e baixas transparências e baixa variância é identificada em 12c(25/08/2006) (Figura 4.19).

O cruzamento entre os compartimentos aquáticos encontrados com a transparência e a banda azul revelou que a 2c(18/11/2005), 8c(20/04/2006) e 13c(26/09/2006) apresentam a melhor relação entre os dados, ou seja, nessas datas, a reflectância diminui com aumento da transparência. Sendo importante para esse resultado as baixas transparências da 2c(18/11/2005) e 13c(26/09/2006) que resultam em maiores reflectâncias e em maiores variâncias, facilitando a identificação de compartimentos aquáticos. Por outro lado, a situação identificada para a 8c(20/04/2006), com menos classes, foi que os compartimentos aquáticos são encontrados em função das áreas contendo baixas, médias e altas transparências. Apesar da fraca relação encontrada entre a reflectância da banda azul e a transparência e, com isso, a não sobreposição dos compartimentos aquáticos, há uma tendência das classes de baixas transparências terem a participação crescente com o aumento da reflectância (Figura 4.20).

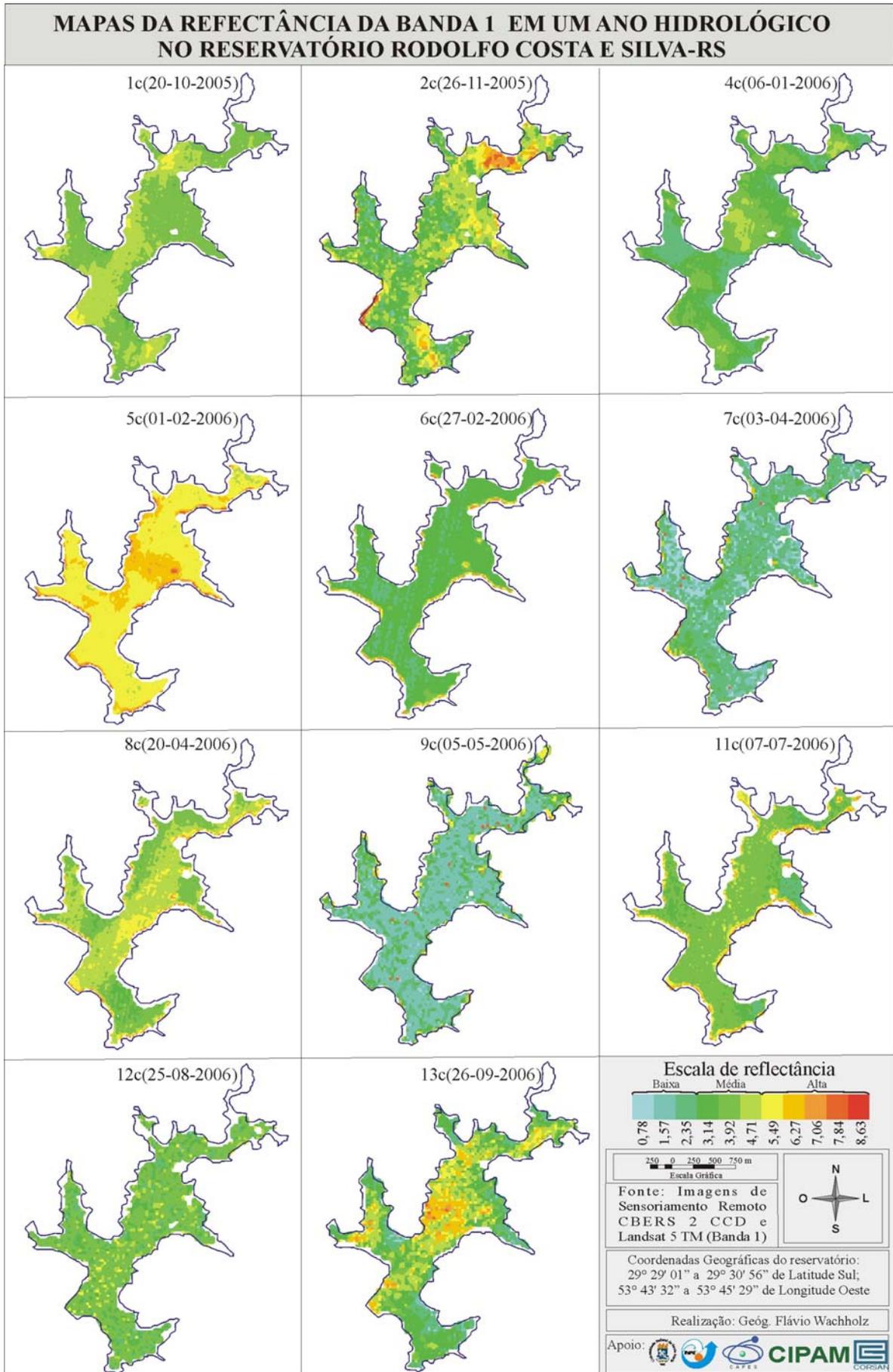


Figura 4.19 - Variação espaço-temporal da reflectância da banda 1 no reservatório Rodolfo Costa e Silva

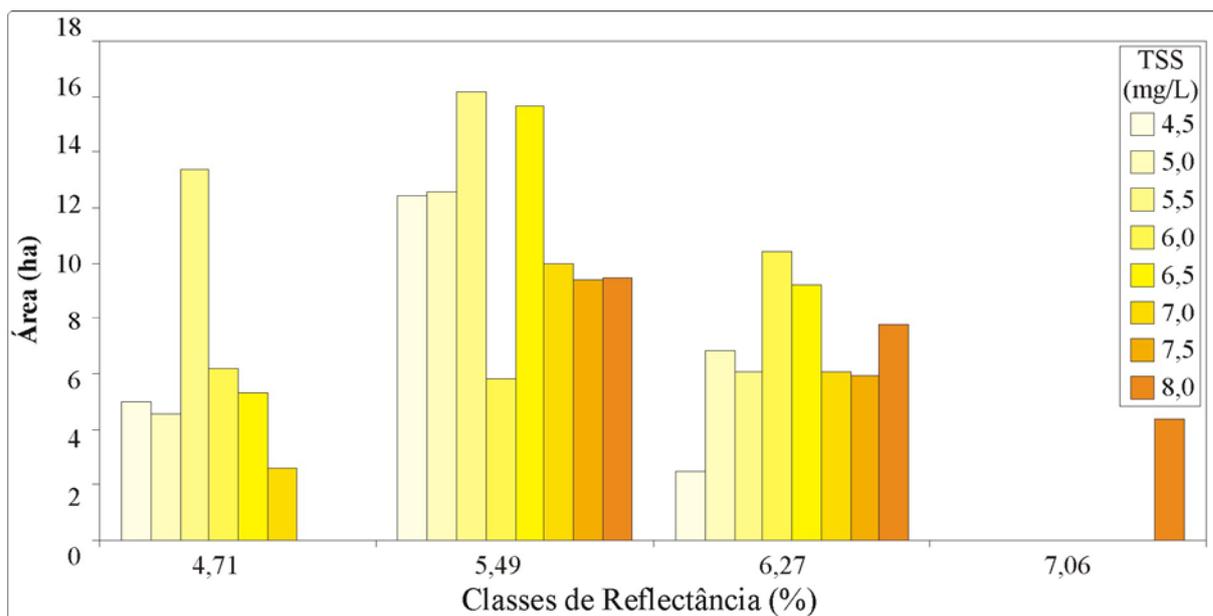


Figura 4.20 - Área dos compartimentos aquáticos da DS em função da reflectância da imagem TM1 para 2c(28/11/2005).

Os dados de transparência de 2c(18/11/2006) permitiram a identificação de três compartimentos aquáticos (CA1, CA2 e CA3) (Figura 4.21a). Porém, para a reflectância da banda TM1, os compartimentos formados foram dois: CA2 e CA3, formando único compartimento (baixas transparências e altas reflectâncias); e o CA1, formando o outro compartimento (altas transparências e baixas reflectâncias). Necessita-se, para diferenciação de compartimentos aquáticos, de baixas transparências e de maiores variações dos dados (Figura 4.21b). Por outro lado, a relação encontrada entre esses ( $r = - 0,45$ ,  $\text{Sig.} = 0,05$ ) demonstra a possibilidade de identificar classes de transparência dentro do reservatório, pois, quanto menor a transparência, maior será a reflectância.

Os compartimentos aquáticos encontrados nas amostras das campanhas 1c(20/10/2005), 4c(06/01/2006) e 11c(07/07/2006) não foram condizentes à variação dos dados da transparência. Acredita-se que outros fatores estejam associados, como a presença de matéria orgânica dissolvida, clorofila, atenuação atmosférica e limitações dos sensores. Destaca-se, também, que a imagem abrange toda a área do reservatório e os compartimentos aquáticos definidos a partir da transparência são resultantes da interpolação dos pontos amostrais.

As imagens de sensoriamento diferiram no desempenho para a identificação de compartimentos aquáticos. As imagens TM1 apresentaram melhor relação com a água em períodos de baixa transparência e nesta condição a identificação dos compartimentos aquáticos ficou melhor definida. Mas, em períodos de maiores transparências e com apenas

um compartimento aquático, a variação de reflectância foi resultante da relação sinal ruído presentes na imagem com sinal muito baixo. Nas imagens CCD1 a presença de ruídos foi menor. Esta condição proporcionou melhor desempenho nos períodos de médias e altas transparências e na definição de único compartimento aquático.

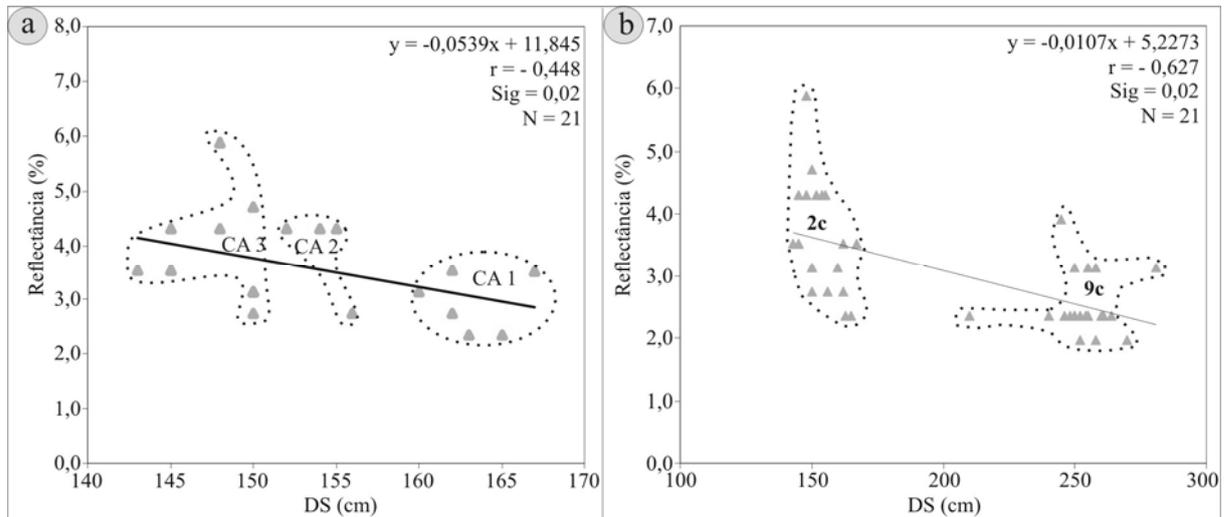


Figura 4.21 - Relação entre a reflectância TM 1 e a transparência. a) Compartimentos aquáticos (CA1; CA2 e CA3) na 2c(18/11/2005). b) Relação entre transparência e reflectância na 2c(18/11/2005) e 9c(05/05/2006).

A imagem CCD 1 da 8c(20/04/2006) e os dados de Chl *a*, considerando os pontos espacialmente localizados a montante do ponto 8, apresentaram relação ( $r = -0,58$ ,  $\text{Sig} = 0,05$ ). Assim, a maior concentração de Chl *a* produz maior absorção e, portanto, menor reflectância. As amplitudes das concentrações de Chl *a* foram menores que 2,50  $\mu\text{g/L}$  para os dois grupos: a jusante e a montante do ponto 8, não sendo suficientes para sensibilizar os detectores do sensor remoto.

O fatiamento da banda verde (Figura 4.22), dos sensores TM e CCD, resultou em menos classes. As classes de maior reflectância deveriam estar relacionadas ao espalhamento da radiação eletromagnética com as maiores concentrações de clorofila. No entanto, a pouca sensibilidade dos sensores nessa banda determinou baixas correlações com os dados de clorofila da 8c(20/04/2006) e 9c(16/05/2006).

O fatiamento da reflectância da banda vermelha (Figura 4.23) foi relacionado com o TSS. A relação da reflectância das bandas do vermelho de ambos os sensores com os dados de TSS foram semelhantes à banda azul e à transparência. Compartimentos aquáticos podem ser definidos com essa banda em algumas datas; porém, diante dos problemas de calibração, comparações entre as datas pouco podem ser realizadas, pois os menores TSS são identificados com menores reflectâncias.

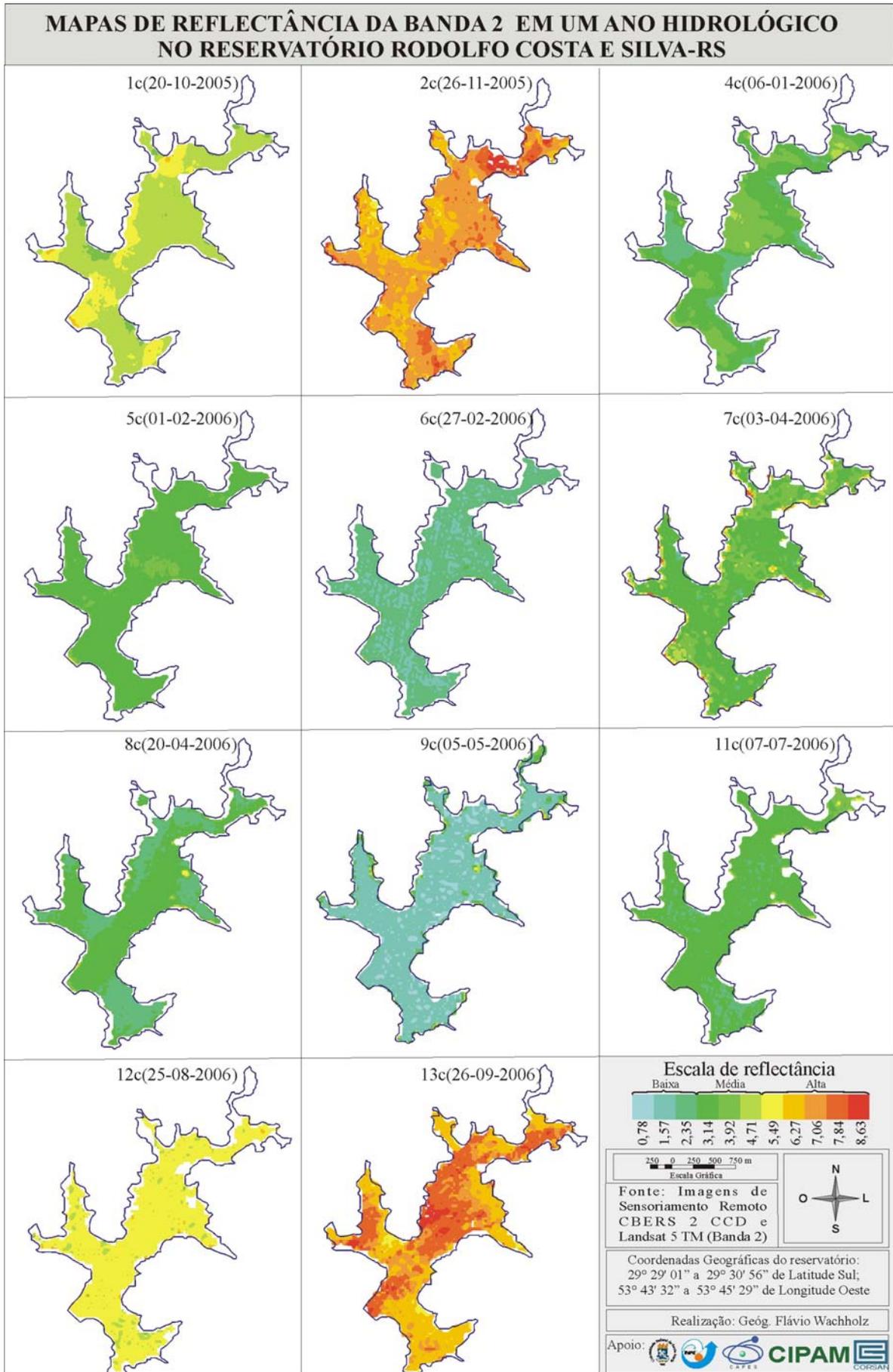


Figura 4.22 - Variação espaço-temporal da reflectância da banda 2 no reservatório Rodolfo Costa e Silva

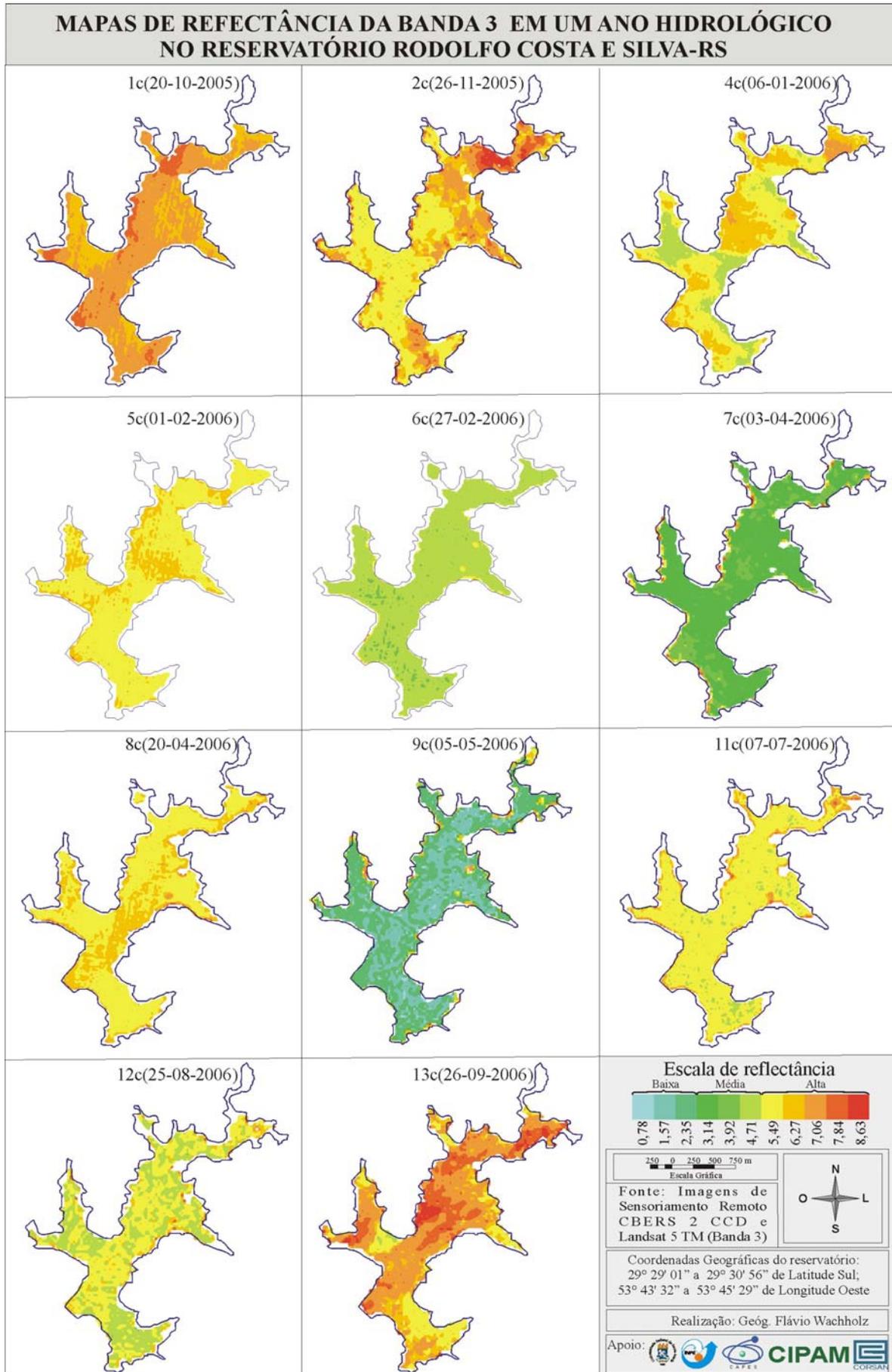


Figura 4.23 - Variação espaço-temporal da reflectância da banda 3 no reservatório Rodolfo Costa e Silva

O cruzamento entre os compartimentos aquáticos encontrados mostrou que os melhores resultados são encontrados para a 1c(20/10/2005), 4c(06/01/2006) e 13c(26/09/2006). Logo, datas com maiores concentrações de TSS determinam uma menor absorção da radiação eletromagnética e as partículas presentes na água aumentam o espalhamento e, conseqüentemente, a reflectância. A maior variância do TSS, como ocorre para as coletas acima citadas, permite a definição de compartimentos aquáticos em imagens orbitais (Figura 4.24).

A baixa relação identificada entre os compartimentos aquáticos da reflectância da banda vermelha e o TSS, que, mesmo conflitantes, apresentam a tendência das classes de altas concentrações de TSS terem a participação crescente com o aumento da reflectância (Figura 4.24).

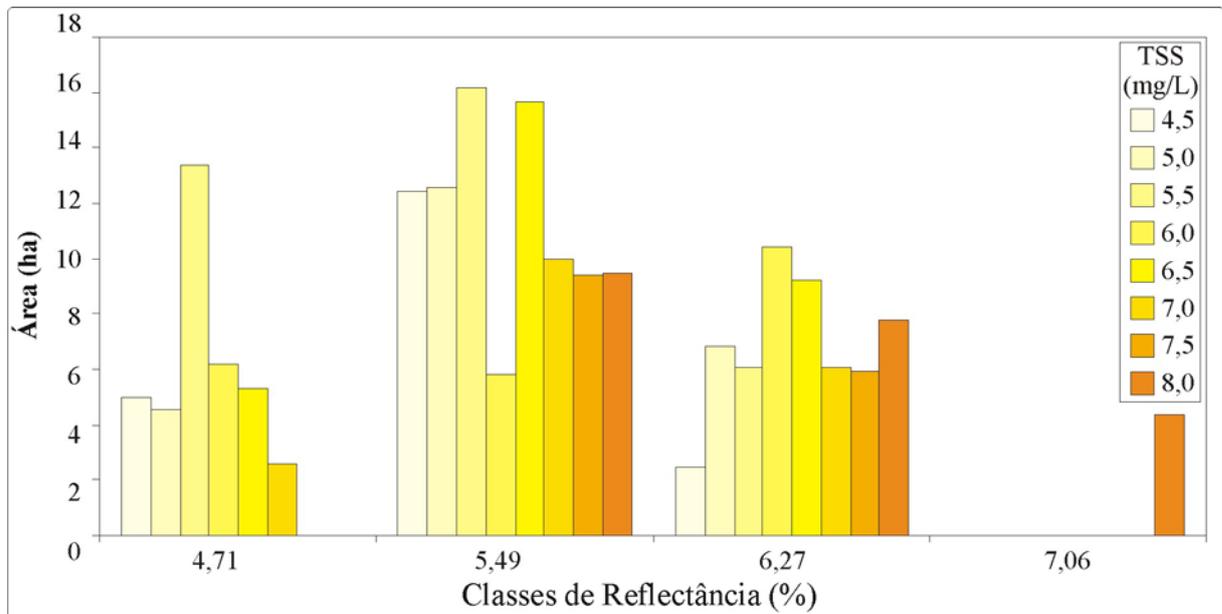


Figura 4.24 - Área dos compartimentos aquáticos do TSS em função da reflectância da imagem CCD3 para 4c(06/01/2006).

Por vezes, as maiores concentrações de TSS, no setor montante, situações identificadas em 2c(18/11/2005), 9c(16/05/2006), 11c(07/07/2006) e 12c(25/08/2006), induziram a maiores reflectâncias no local. Nas demais áreas, as menores concentrações de TSS não possibilitaram detectar variação na reflectância.

As variações dos dados do TSS e a sua maior concentração resultaram na maior relação com a reflectância do CCD3 em 4c(06/01/2006) (Figura 4.26a). Foram identificados três compartimentos aquáticos para o TSS e somente dois, quando restringida a reflectância aos pontos amostrais. Denota-se que, quando as concentrações de TSS são maiores, há

maiores reflectâncias capazes de sensibilizar o sensor e diminuir a influência dos ruídos, melhorando a relação sinal ruído.

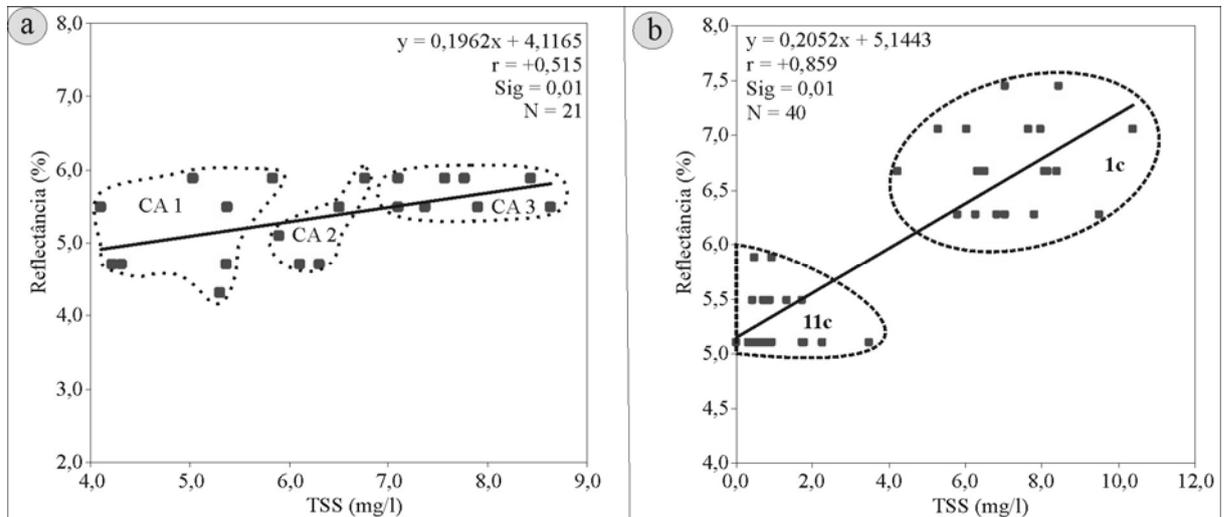


Figura 4.25 - Relação entre a reflectância CCD 1 e o TSS. a) Compartimentos aquáticos (CA1; CA2 e CA3) na 4c(06/01/2006). b) Relação entre TSS e a reflectância na 1c(20/10/2005) e 11c(07/07/2006).

A análise em dois períodos com o uso dos sensores CCD e TM, na condição de baixas e altas concentrações de TSS, demonstraram uma melhor relação com os dados de reflectância (Figura 4.26b). Verifica-se quando a diferença de concentração de TSS é superior a 4 mg/L, o sensor consegue registrar nas imagens o contexto espacial e temporal dessa variação. Imediatamente, períodos de maiores concentrações apresentam maiores reflectâncias e a possibilidade de identificar compartimentos aquáticos.

#### 4.4 - Síntese dos compartimentos aquáticos

Os compartimentos aquáticos do reservatório Rodolfo Costa e Silva, para o ano hidrológico estudado e tendo-se como base as variáveis DS e TSS, são compreendidos em dois períodos: de agosto a novembro e de dezembro a julho. Essas divisões são decorrentes das diferenças de concentração de TSS e a da transparência do DS, sendo reguladas pelo regime de precipitações e solo exposto, conforme descrito nos itens 4.2.1 e 4.2.2. Períodos de maiores precipitações e solo exposto (agosto a novembro) tendem a ter as variáveis limnológicas mais alteradas. Por outro lado, essa situação favorece a identificação de compartimentos aquáticos a partir de imagens orbitais multiespectrais. A tabela 4.6 mostra a síntese dos compartimentos aquáticos encontrados no ano hidrológico.

Tabela 4.6 - Síntese dos compartimentos aquáticos encontrados no ano hidrológico

Período	Compartimentos aquáticos	Comportamento/ concentração	Motivos	Imagens Orbitais
Agosto a novembro	Montante	-Baixa DS: aumenta de Montante a Jusante; - Alto TSS: a concentração diminui da montante a jusante	- Precipitações mais acentuadas; - Participação das áreas de solo exposto	As imagens TM e CCD apresentam-se mais adequadas na separação de compartimentos aquáticos
	Intermediário			
	Jusante			
Dezembro a julho	Montante	- Alta transparência DS: pouca diferença de montante a jusante - Baixa concentração de TSS: pouca diferença de montante a jusante	- Precipitações pouco significativas - Áreas agrícolas protegidas	As imagens não foram adequadas para identificar pequenas variações de TSS e clorofila
	Intermediário-Jusante			

A Figura 4.26 mostra o comportamento das variáveis TSS e DS durante o ano hidrológico. As curvas são estabelecidas por uma equação polinomial, com um coeficiente de determinação de 0,58 para o TSS e 0,77 para o DS. Essas equações podem ser utilizadas, se mantidas as mesmas condições, para estimar as das variáveis limnológicas durante outro período. As relações entre as mesmas, que representam a média do reservatório, são dadas pelo coeficiente de determinação 0,77 e pelas equações lineares  $TSS = -0,0415DS + 12,781$  e  $DS = -18,611TSS + 287,88$ .

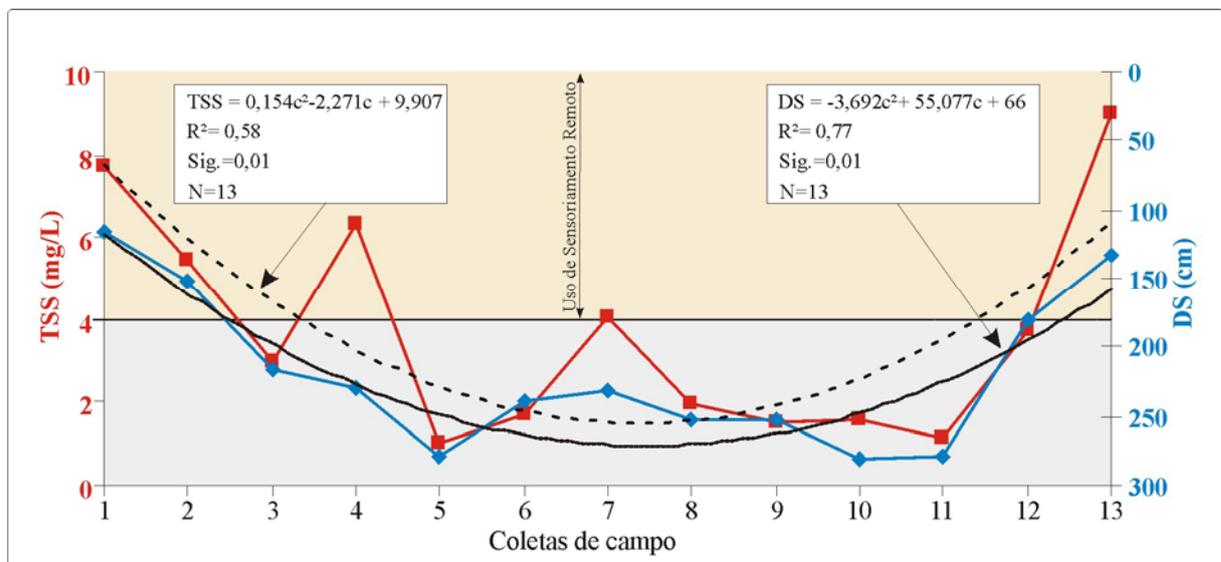


Figura 4.26 - Média da concentração de TSS e transparência do DS durante o ano hidrológico e suas curvas de tendência

Os condicionantes à ocorrência dos compartimentos aquáticos estão relacionados à contribuição terrestre e às características intrínsecas do reservatório. A dinâmica associada a contribuição terrestre decorre de fatores naturais e antrópicos. As características inerentes do

reservatório são decorrentes da presença de macrófitas aquáticas, paliteiros, ilhas, reentrâncias, antigo dique e própria profundidade. Ambos condicionantes são apresentados na Figura 4.27 e detalhados a seguir:

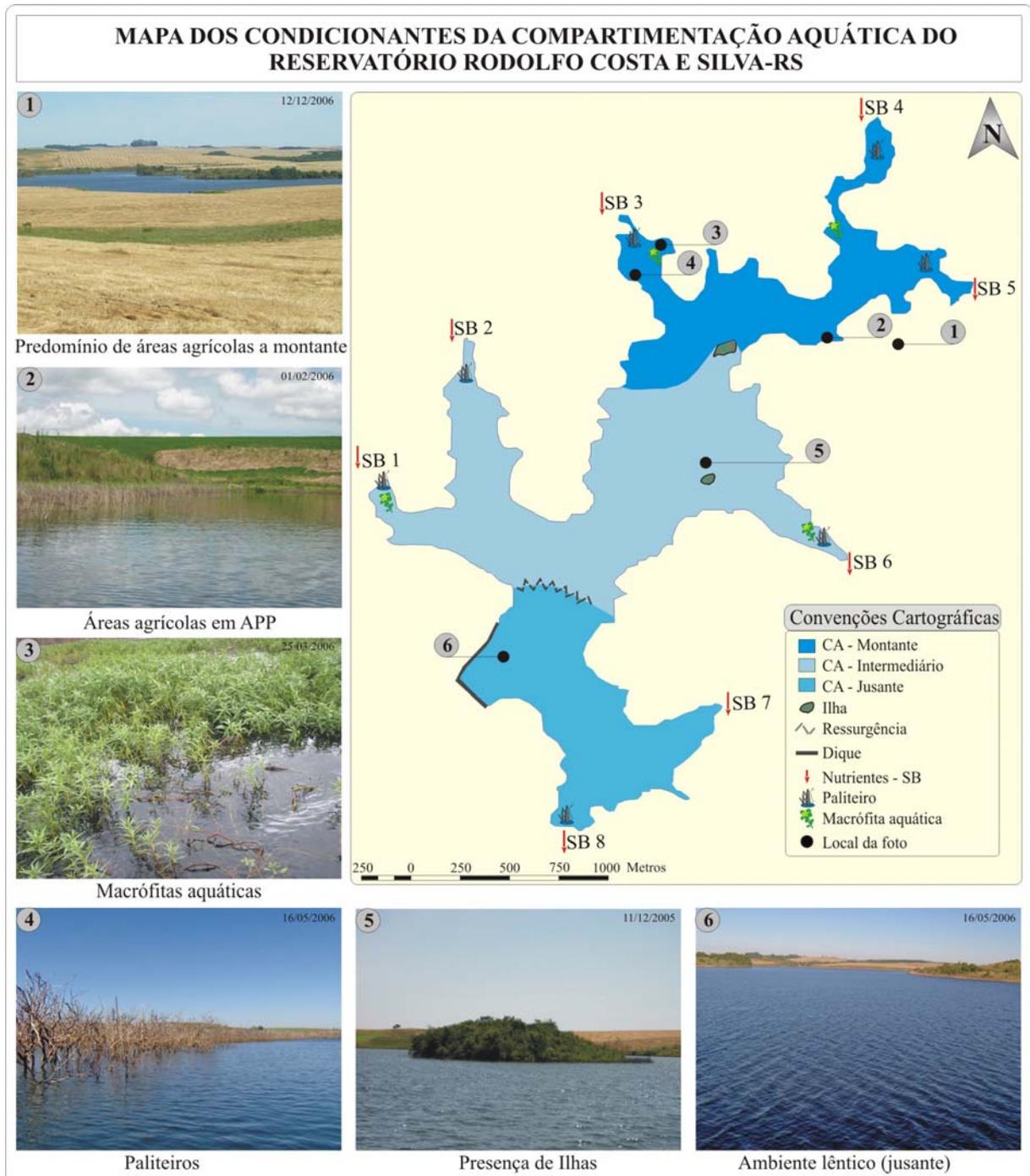


Figura 4.27 - Condicionantes da compartimentação aquática do reservatório Rodolfo Costa e Silva

- Fatores naturais: as maiores SBs estão localizadas na montante do reservatório. As SBs 3, 4 e 5 ocupam 80% do ambiente terrestre da bacia hidrográfica. Além disso, essas SBs

apresentam as maiores densidades de drenagem e coeficientes de rugosidade. Esses condicionantes repercutem maior escoamento superficial e, associados à área de abrangência, disponibilizam um maior volume hídrico ao reservatório.

- Fatores antrópicos: as maiores áreas antrópicas estão localizadas no setor montante do reservatório. As SBs 3, 4 e 5 ocupam 80% das áreas agrícolas da bacia hidrográfica. Em outubro e novembro, muitas dessas áreas ficam em solo exposto, facilitando as perdas por escoamento superficial. Além disso, na montante, as áreas de preservação permanente do reservatório (100 m) são ocupadas por áreas agrícolas. No setor jusante, ao contrário, essas áreas encontram-se preservadas.

- Macrófitas aquáticas: localizadas nos afluentes de outubro a março, retêm parte dos nutrientes disponibilizados pelas SBs. Quando as macrófitas entram em decomposição, disponibilizam uma alta quantidade de matéria orgânica para o sistema aquático.

- Paliteiros: com localização nas nascentes, constituem-se de vegetação afogada durante o enchimento do reservatório, porém liberam continuamente matéria orgânica ao sistema.

- As ilhas e as reentrâncias: reduzem os movimentos de circulação da água, mantendo as condições locais.

- Antigo dique (ressurgência): surge como uma barreira na movimentação da água e, assim, atua na ressurgência das características da água. A jusante desse, estão localizadas as maiores profundidades do reservatório.

- Profundidade: áreas menos profundas são mais propícias ao desenvolvimento de macrófitas aquáticas e à movimentação da água, ressuspende os sedimentos. Áreas muito profundas (34 m) e abertas, como ocorrem no setor jusante do reservatório, que tendem a ter maior circulação da água e, em função do grande volume hídrico, o ambiente terrestre interfere com menor intensidade nas variáveis limnológicas.

### 5. – CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características limnológicas do reservatório Rodolfo Costa e Silva apresentaram variabilidade espaço-temporal. As maiores perturbações são observadas de agosto a novembro, quando há uma maior contribuição do ambiente terrestre em função do maior volume de precipitações e da disponibilidade de solo exposto nas bacias hidrográficas. Essa interferência passa a ser menor, de dezembro a julho, quando as precipitações são menores e a presença de solo exposto também é menor (desenvolvimento vegetativo das culturas agrícolas e maior cobertura do dossel).

As concentrações de TSS são superiores a 4 mg/L, quando as áreas agrícolas encontram-se expostas (agosto a novembro). Áreas desprotegidas facilitam a erosão pluvial nas vertentes, carregando material para o reservatório. Como as maiores SBs estão localizadas no tributário principal do reservatório, a quantidade de material disponibilizado é maior nesse setor montante. Logo, aparece no local um compartimento aquático com as maiores concentrações de TSS. Parte desse material é depositado até atingir o setor jusante do reservatório, formando outro compartimento aquático (jusante) com menores concentrações.

A transparência do disco de Secchi apresentou uma relação inversamente proporcional ao TSS ( $r = -0,87$ , Sig. 0,05). Destaca-se que, a participação de fitoplâncton e zooplâncton no TSS é maior de janeiro a abril; quando em consonância, há uma maior disponibilidade de luz e transparência. Porém, o aumento de plânctons provoca maiores concentrações de TSS, com pouca interferência na transparência. Os compartimentos aquáticos formados estão principalmente localizados a montante do reservatório com as menores transparências e a jusante do antigo dique, com as maiores transparências. O setor intermediário tende a formar o compartimento central de médias transparências, com a maior abrangência de área.

As clorofilas *a*, *b* e *c* conseguiram separar com eficiência dois compartimentos aquáticos: centro-montante, com maior produção primária; e centro-jusante, com baixa produção primária. Com as altas concentrações, o compartimento aquático centro-montante pode estar em contínuo processo de eutrofização, pois, na 13c(26/09/2006), as maiores concentrações de SOS também foram encontradas, com a identificação do mesmo compartimento aquático.

Os dados de espectrorradiometria de campo em 9c(16/05/2006) permitiram a

identificação das bandas de absorção das clorofilas *a* e *c* e a relação com as suas concentrações, sobre os demais componentes opticamente ativos. Destaca-se que, em função das baixas concentrações de TSS (1,54 mg/L), essa variável pouco influenciou no albedo.

A identificação de compartimentos aquáticos em imagem orbitais é possível quando as concentrações de TSS são superiores a 4 mg/L e tenham a amplitude do mesmo valor. Para a transparência, a relação com a banda azul ocorre quando a amplitude for de 40 cm e o valor máximo for 200 cm. Logo, as imagens orbitais CCD e TM obtidas entre agosto a novembro são as mais adequadas na identificação de compartimentos aquáticos no reservatório Rodolfo Costa e Silva. Todavia, as outras datas com menores variações e concentrações das variáveis limnológicas não são capazes de sensibilizar os detectores do sensor e, assim, formam um único compartimento aquático.

### **5.1 - Sugestões e recomendações**

- Realizar o monitoramento das macrófitas aquáticas, com a identificação do ciclo e ocorrência, pois essas influenciam nas variáveis limnológicas e dependendo da fase de desenvolvimento em que se encontram, apresentam influência na formação de compartimentos aquáticos.

- Indica-se a coleta de dados de clorofila no mês de janeiro, período de maior disponibilidade de luz e, portanto, ideal para avaliar a produção primária. Na oportunidade é importante realizar a espectrorradiometria de campo na mesma data, a fim de compreender a participação dos componentes opticamente ativos;

- As imagens de sensoriamento remoto podem ser utilizadas para monitorar o reservatório. Recomendam-se usar imagens de datas, preferencialmente de setembro a abril quando o grau de elevação solar é maior, pois a correção atmosférica passa a ser mais eficiente e as variáveis opticamente ativas apresentam maiores concentrações e variâncias.

- Os proprietários rurais da bacia hidrográfica devem ser orientados para manejo de suas áreas agrícolas com a utilização de curvas de nível, rotação de culturas, adubação verde, plantio direto, conservação e implantação de floresta ripária, a fim de diminuir as perdas de solo e a deterioração da qualidade da água do reservatório.

## 6. – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTI, E. A. **Influência do setor rural e urbano no arroio Alberti no município de São João do Polêsine-RS**. 2001. 50 f. Trabalho de Graduação B (Bacharelado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2001.

ALBERTI, E. A. **Uso da terra e a influência em variáveis limnológicas na microbacia hidrográfica da Sanga Funda-São João do Polêsine/RS**. 2004. 95 f. Monografia (Especialização em Geociências)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

AMBERS, R. K. R. Using the sediment record in a western Oregon flood-control reservoir to assess the influence of storm history and logging on sediment yield. **Journal of Hydrology**, v. 244, n. 3-4, p. 181 – 200, 2001.

ANGELINI, R. Bases para a aplicação da teoria da informação em ecossistemas, com ênfase na ascendência. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 2, p. 275-283, 2002.

ASD – Analytical Spectral Device. **FieldSpec UV/VNIR**. Handheld Espectroradiometer User's Guide. Disponível em: <<http://www.asdi.com>> . Acesso em: 15 maio 2007.

ASSIREU, A.; et al. Existe relação entre a complexidade geométrica do entorno dos reservatórios e a variabilidade espacial dos parâmetros limnológicos? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis, **Anais...**, Florianópolis: INPE, 2007. p. 3263 - 3269.

BABBIT, H. E.; DOLAND, J. J.; CLEASBY, J. L. **Abastecimento de água**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.

BARBOSA, C. C. F.; et al. Caracterização Espectral das Massas d'água Amazônicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte, **Anais...**, Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2419 - 2425.

BRANCO, S. M.; ROCHA, A. A. **Poluição, proteção e usos múltiplos de represas**. São Paulo: Edgard Blücher, CETESB, 1977.

BREUNIG, F. B. **Características limnológicas e espectrais do reservatório de água da CORSAN, Itaara/Júlio de Castilhos-RS**. 2006. 131 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

BREUNIG, F. M.; et al. Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva - Itaara/RS, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. , v.2, n. 2, p.88 - 102, 2007.

CÂMARA G; et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Journal of Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, 395-403, 1996.

CARVALHO, N. O. Assoreamento de reservatórios: conseqüências e mitigação dos efeitos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 4, 2000, Santa Maria, **Anais...**, Santa Maria: UFSM, 2000.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Guia de coleta e preservação de amostras de água**. São Paulo: CETESB, 1987.

CLARK, R.N.; ROUSH, T.L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**. v. 89, n. B7, p. 6329-6340, July 10, 1984.

CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento. **Barragem Rodolfo Costa e Silva (Val de Serra) Sistema de Abastecimento de Água de Santa Maria**. (Características técnicas). Santa Maria: SURCEN, 2007. (Dados não publicados).

CORSAN/SURCEN. **Nível da Barragem Rodolfo Costa e Silva**. (Planilha). Santa Maria: SURCEN, 2007. (Dados não publicados).

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras**: casos históricos, materiais de construção, projeto. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CURRAN, P. J. **Principles of remote sensing**. New York: Longman Scientific & Technical, 1986.

CURRAN, P. J.; NOVO, E. M. M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. **Journal of Coastal Research**, v. 4, n. 3, p. 351-368, 1988.

DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 1993, 211 p. Doctor Thesis (Hyperspectral remote sensing of water quality). Vrije Universiteit, 1993.

EIPHANIO, J. C. N. CBERS – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, **Anais...**, Goiânia: INPE, 2005. p. 915 - 922.

ESTEVES, F. DE A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FIBGE. **Levantamento dos recursos naturais volume 33**: Folha SH. 22 Porto Alegre e parte das Folhas SH 21 Uruguaiana e SI 22 Lagoa Mirim. Projeto RadamBrasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

GALVAO, L. S. Espectros e Imagens. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (Org.). **Sensoriamento Remoto**: Reflectância dos Alvos Naturais. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001, p. 251-262.

GIARDINO, C.; et al. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. **The Science of the Total Environment**, v. 268, n. 1-3, p.19–29, 2001.

INPE-CPTEC. **Plataforma Coleta de Dados**. São Martinho da Serra. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/PCD/historico/passo4.jsp>>. Acesso em: 15 maio 2007.

JEFFREY, S. W. AND HUMPHREY, G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. **Biochem. Physiol.**, n. 167, p. 191-194, 1975.

KIMMEL, B.L; LIND; O.T. PAULSON, J.L Reservoir Primary Production. In: **Reservoir Limnology: Ecological Perspectives**. Edited by K.W, B.L. Kimmel, and F.E Payne. New York: John Wiley and sons, 1990. pp.133-173

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

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. New Jersey: Prentence-Hall, 2000.

LONDE, L. R.; NOVO, E. M. L. M.; CALIJURI, M. C. Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, **Anais...**, Goiânia: INPE, 2005. p. 389 - 396.

MANTOVANI, J. E. **Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada**. 1993, 99 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1993.

MARGALEF, R. **Limnología**. Barcelona: Omega, 1983.

MCFEETERS, S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p.1425–1432, 1996.

MEER, F. Van der. Spectral curve shape matching with a continuum removal CCSM algorithm. **International Journal of Remote Sensing**. v. 21, n. 16, p. 3179-3185, 2000.

MILLIPORE. **Glass Fiber Filters**. Disponível em: <<http://www.millipore.com>>. Acesso em: 02 fev. 2006.

MILTON, E. J. Principles of Field Spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 12, p.1807-1827, 1987.

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

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. Rio de Janeiro: Abes, 1997.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A.K. Continuum-removed absorption features estimate tropical savanna grass quality *in situ*. IN: WORKSHOP ON IMAGING SPECTROSCOPY, 3., 2003, Herrsching, **Proceedings...**, Herrsching: ITC, 2003.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **Applied Research & Technology Project Office**. Disponível em: <<http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>>. Acesso em: 05 jan. 2006.

NELLIS, M. D.; HARRINGTON JR, J. A.; WU, J. Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and secchi depth in Tittle Creek Reservoir, Kansas: 1993. **Geomorphology**, v. 21, n. 3-4, 281 - 293, 1998.

NOERNBERG, M. A.; et al. Relação entre profundidade Secchi e fator de reflectância da água de ambientes aquáticos lênticos em Cachoeira Paulista, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador, **Anais...**, Salvador: INPE, 1996. p. 933-939.

NOVO, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (Org.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001, p.203-224.

NOVO, E. M. L. M. Utilização de dados de sensoriamento remoto em estudos ambientais. **Geografia**, v. 13, n. 25, p. 43-51, 1988.

NOVO, E. M. L. M.; et al. Distribuição sazonal de fitoplâncton no Lago Grande de Curuai em resposta de inundação do rio Amazonas a partir da análise de imagens MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, **Anais...**, Goiânia: INPE, 2005. p. 3175 - 3182.

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

NUSH, E. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigments determination. **Arch. Hydrobiol.**, v. 4, p. 14-36, 1980.

OUMA, Y. O; TATEISHI, R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n. 15, p. 3153-3181, 2006.

PEREIRA FILHO, W. Sensoriamento remoto, integração de dados e manejo de barragens. **Revista Selper**, v.7, n. 4, p. 33-35, 1990.

PEREIRA FILHO, W. **Influência dos Diferentes Tipos de Uso da Terra em Bacias Hidrográficas sobre Sistemas Aquáticos da Margem Esquerda do Reservatório de Tucuruí-Pará**. 2000. 138 f. Tese (Doutorado em Geografia Humana)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PEREIRA FILHO, W. **Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo da influência das características da bacia de captação na concentração de sólidos em suspensão em reservatório: O exemplo de Tucuruí**. 1991, 175 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – São José dos Campos, 1991.

PEREIRA FILHO, W.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. Influência das condições de tempo em espectros de reflectância da água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, **Anais...**, Goiânia: INPE, 2005. p. 415-422.

PEREIRA FILHO, W.; GALVÃO, L. S. Relações entre reflectância espectral e concentração de sedimentos em suspensão no reservatório Passo Real, região Sul do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1997, Mérida, **Anais...**, Mérida: Selper, 1997.

PEREIRA FILHO, W.; NOVO, E. M. L. M. Limnological variables and macrophyte infestation in Tucuruí reservoir - Para - Brazil. Geoscience and Remote Sensing Symposium. **IGARSS '02 IEEE International**, v. 5, p. 3092- 3094, 2002.

POMPÊO, M.L.M. **O disco de Secchi**. Bioikos, 13(1/2): 40-45, 1999. Disponível em: <<http://mpompeo1.sites.uol.com.br/index.html>>. Acesso em: 26 jun. 2006.

POMPÊO, M.L.M. (ed.). **Perspectivas da Limnologia no Brasil**. São Luís: União, 1999.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

RITCHIE, J. C.; SCHIEBE, F. R. Water Quality. In: SCHULTZ, G. A.; ENGMAN, E. T.(Eds). **Remote sensing in hidrology and water management**. Berlin: Springer, 2000.

RSI – Research Systems Inc. **ENVI - The Environment for Visualizing Images**. Version 4.1. Connection: Research Systems, 2004.

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.

RUNDQUIST, D. C.; et al. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrametric Engeniniering and Remote Sensing**, v. 62, n. 2, p. 192 – 200, 1996.

SARTORI, M. da G. B. **Clima e Percepção**. 2000. 227 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2000. V.1

SARTORI, M. da G. B. **O Clima de Santa Maria: do Regional ao Urbano**. 1979, 165 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.

SOUZA, B. S. P. **A qualidade da agua de Santa Maria/RS : uma analise ambiental das sub-bacias hidrograficas dos rios Ibicui Mirim e Vacacai Mirim**. 2001. 234 f. Tese (Doutorado em geografia física) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

STRASSBURGER, L. **Uso da terra nas bacias hidrográficas do rio do Peixe (SC) e do rio Pelotas (RS/SC) e sua influência na limnologia do reservatório da UHE-Itá (RS/SC)**. 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

THORNTON, K. W.; KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E. **Reservoir limnology: ecological perspectives**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

TODESCHINI, M. L. **Dinâmica espacial e temporal das características físicas e químicas do rio Cubatão e distribuição espacial da bacia hidrográfica – litoral do Paraná**. 2004, 144 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

TUNDISI, J. G. ; et al. Limnologia de águas interiores: Impactos, conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras, 1999. p. 195-225.

TUNDISI, J. G. **Boletim de hidráulica e saneamento: Limnologia de represas artificiais**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1986 (Boletim; n. 11).

VERMOTE, E. F.; et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.

WACHHOLZ, F. **Influência do ambiente terrestre nas variáveis aquáticas em áreas de captação na bacia hidrográfica do arroio Barriga - RS, a partir de imagens de satélite CBERS 2 CCD**. 2004. 79 f. Monografia (Trabalho de Graduação A) - Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensing imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.