

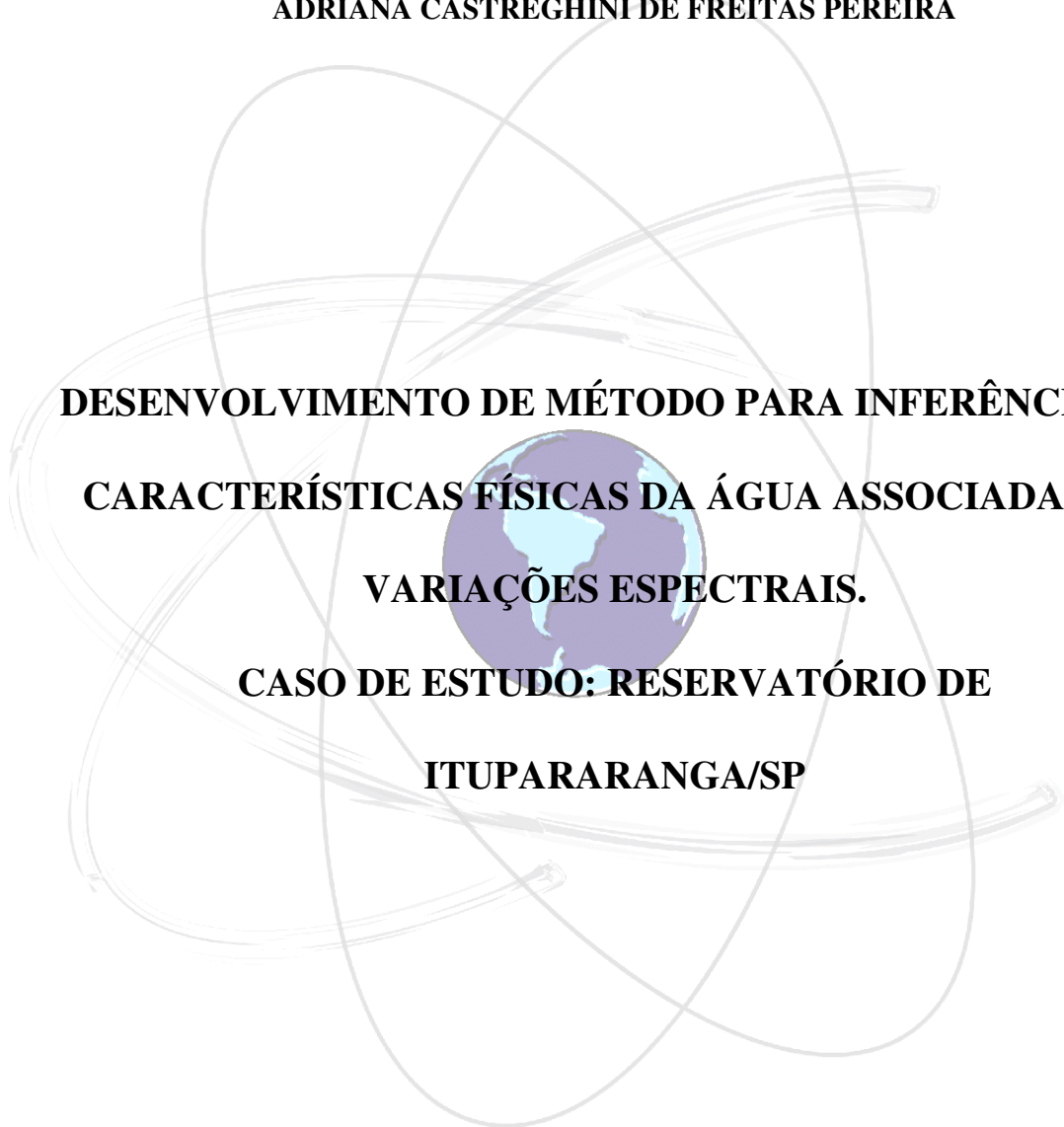
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**



CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
*Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas*

---

**ADRIANA CASTREGHINI DE FREITAS PEREIRA**

A large, faint background graphic consisting of several overlapping, hand-drawn style orbits or paths in a light gray color. In the center of these orbits is a small, stylized globe of the Earth, showing the continents in light blue and the oceans in a darker blue. The globe is positioned behind the main title text.

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA INFERÊNCIA DE  
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁGUA ASSOCIADAS ÀS  
VARIAÇÕES ESPECTRAIS.  
CASO DE ESTUDO: RESERVATÓRIO DE  
ITUPARARANGA/SP**

**TESE**

**Presidente Prudente**  
2008

**ADRIANA CASTREGHINI DE FREITAS PEREIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA INFERÊNCIA DE  
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁGUA ASSOCIADAS ÀS  
VARIAÇÕES ESPECTRAIS.  
CASO DE ESTUDO: RESERVATÓRIO DE  
ITUPARARANGA/SP**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria de Lourdes  
B. T. Galo**

**Co-orientador: Prof. Dr. Edivaldo D. Velini**

Presidente Prudente  
2008

P489d Pereira, Adriana Castreghini de Freitas  
Desenvolvimento de método para inferência de características físicas da água associadas às variações espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP / Adriana Castreghini de Freitas Pereira. - Presidente Prudente: [s.n], 2008  
xiii, 206 f.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Orientador: Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo, Edivaldo Domingues Velini  
Banca: Cláudio Clemente Faria Barbosa, Waterloo Pereira Filho, Renata Ribeiro de Araújo, Vilma Mayumi Tachibana  
Inclui bibliografia

1. Sensoriamento Remoto da água. 2. Inferência estatística. 3. Imagens de alta resolução espacial I. Autor. II. Título. III. Presidente Prudente - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

CDD (18. ed.) 621.71

**BANCA EXAMINADORA**



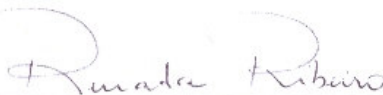
PROFA. DRA. MARIA DE LOURDES BUENO TRINDADE GALO  
(ORIENTADORA)



PROF. DR. CLÁUDIO CLEMENTE FARIA BARBOSA  
(INPE)



PROF. DR. WATERLOO PEREIRA FILHO  
(UFMS)



PROFA. DRA. RENATA RIBEIRO DE ARAUJO



PROFA. DRA. VILMA MAYUMI TACHIBANA

  
ADRIANA CASTREGHINI DE FREITAS PEREIRA

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 28 DE NOVEMBRO DE 2008.

RESULTADO: APROVADA

*Para meus queridos Eduardo, companheiro de todos os momentos, Gabriel, que compreendeu carinhosamente todos os meus “não”, e à pequena Juliana, que tantas vezes doou o “colinho da mamãe” a esta tese, dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, minha força maior, pela família que tenho e pelas amizades verdadeiras que construí durante essa caminhada.

Minha mãezinha querida, Áurea, que com amor e dedicação, cuidou de *quase tudo* por mim; e à memória de meu pai, Anterino, que tanto orgulho teve em vida de suas filhas.

Eduardo, meu querido marido, que com paciência e dedicação, cuidou de mim e de nossos filhos, em todos os momentos, mas principalmente naqueles em que a insegurança e o desânimo falavam mais alto.

Aos meus queridos e amados filhos Gabriel e Juliana, que tiveram que conviver com minha ausência e quando não, com minha ansiedade e impaciência.

Às minhas irmãs, Bel e Olga, pelo exemplo que são de dedicação e competência, em suas vidas profissionais e pessoais, e pelo apoio e incentivo que me deram durante essa pesquisa; meu cunhado Henrique pelas palavras e conselhos, e meu sobrinhos Deborah, Nicole e Marcel, que torceram tanto por mim.

À Prof.<sup>a</sup> Maria de Lourdes, pela orientação à pesquisa, disponibilidade de tempo para o trabalho de campo e discussões e sugestões na organização do trabalho.

Ao Prof. Edivaldo Velini, por tornar possível o trabalho de campo, disponibilizando equipamentos e sua equipe de pesquisadores, e pelo fornecimento das imagens multiespectrais de média e alta resolução espacial.

Ao Prof. Nilton Imai, pelas discussões tão importantes no decorrer do curso e à Prof.<sup>a</sup> Vilma Tachibana e Prof.<sup>a</sup> Renata Ribeiro, pelo carinho e atenção a mim dispensados em todos esses anos. Ao Prof. Tommaselli, pelos conselhos e incentivo nos momentos difíceis.

A Dra. Evlyn Novo, que cruzou o meu caminho num momento delicado e soube, com carinho e enorme competência, me orientar a prosseguir.

Aos meus queridos amigos do PPGCC, que sempre me incentivaram com palavras e troca de conhecimentos, em especial: Rejane, Tiago, Lauriana, Maria Lígia, Priscila, Nilcilene, Daniela Vicentin, Letícia Bosch, Letícia Nalin, Juliano, Tiedtke e Gabriel.

Ao PROCAD e seus idealizadores, pela oportunidade de troca de experiências e aprendizado com os pesquisadores do INPE e da UFSM, em especial ao pesquisador Enner Alcântara (Inpe), pela coleta e tratamento dos dados espectrais em campo e discussões sobre a tese.

À CAPES pela bolsa de doutorado e ao PPGCC pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa.

## RESUMO

Na sociedade atual, discussões relacionadas à água potável tem ocupado um espaço importante, principalmente no meio científico, onde, através de pesquisas voltadas à disponibilidade e qualidade das águas é possível preparar diagnósticos e apontar soluções para planejadores e tomadores de decisões. Nesse contexto, o objetivo geral do trabalho foi desenvolver um método para inferência de variáveis limnológicas que indicam a qualidade da água e estejam associadas à sua característica espectral, em um reservatório de uso múltiplo e avaliar sua correlação com dados espectrais tomados “in situ” e extraídos de imagens orbitais de satélites de alta resolução espacial. Para tanto, uma imagem multiespectral do satélite Ikonos II foi adquirida, quase simultaneamente a coleta de dados limnológicos e espectrais “in situ”, em pontos amostrados adequadamente no corpo d’água, e posicionados com GPS. Devido à heterogeneidade das condições do tempo no levantamento de campo, uma nova abordagem amostral foi necessária, que se deu pela divisão da amostra em quatro conjuntos, quais foram: conjunto 1 (céu aberto e vento fraco), conjunto 2 (céu aberto e vento de médio a forte), conjunto 3 (céu nublado e vento fraco) e conjunto 4 (céu nublado e vento de médio a forte). As análises de correlação entre todos os dados disponíveis para a pesquisa foram realizadas separadamente para os quatro conjuntos. As curvas espectrais dos pontos pertencentes a cada conjunto foram tratadas com técnicas de remoção do contínuo e razão e diferença espectral. A imagem multiespectral Ikonos foi submetida a técnicas de processamento e análise de imagens multiespectrais, bem como a técnica de razão espectral aplicada às bandas. Análises de correlação entre os dados coletados “in situ” (variáveis limnológicas e curvas espectrais) e a imagem multiespectral foram realizadas e para os dados correlacionados, métodos de regressão linear clássica foram aplicados à amostra, gerando modelos empíricos de inferência das variáveis limnológicas: Transparência, TSS, Turbidez e Condutividade elétrica. Finalmente, foi realizada a espacialização das variáveis Transparência da água, a partir da Profundidade de Secchi e Turbidez, cuja inferência utilizou dados extraídos das imagens multiespectrais. Os resultados demonstraram a aplicabilidade do método proposto, uma vez que foi possível inferir e realizar a distribuição espacial a partir da imagem multiespectral para as variáveis limnológicas Transparência, para o conjunto amostral 3 e Turbidez, para o conjunto amostral 4. Esses dois modelos de inferência, assim como os demais (Log(TSS) e Log(Turbidez) para o conjunto 2; Condutividade Elétrica para o conjunto 3 e TSS para o conjunto 4) gerados nesta pesquisa, foram estatisticamente validados e aceitos

pelo método adaptado “jackknife”. Concluiu-se que o trabalho atingiu os objetivos propostos e apresentou um método de inferência das variáveis limnológicas Transparência, TSS, Turbidez e Condutividade Elétrica, relacionadas à sua qualidade e associadas à sua característica espectral, para o reservatório de Itupararanga, que pode ser utilizado em outros reservatórios, desde que observadas as características específicas do corpo d’água em questão.

**Palavras Chaves:** Sensoriamento Remoto da água, inferência estatística, imagens de alta resolução espacial, distribuição espacial de variáveis limnológicas, componentes opticamente ativos.

## ABSTRACT

In current society, drinkable water has been the subject of innumerable debates, mainly in scientific groups, in which, through researches focused on the availability and water quality, it is possible to prepare diagnoses and point out solutions to planners and decision makers. In this context, the general aim of the research was to develop a method for the inference of physical limnological variables that indicate the quality of the water and that are associated to its spectral characteristic, in a multiple use reservoir and evaluate its correlation to spectral data collected "in situ" and extracted from orbital images of high definition space satellites. In order to achieve that, a multispectral image of the satellite Ikonos II was acquired, almost simultaneously to the gathering of limnological and spectral data "in situ", in points sampled adequately in the water surveyed, and positioned by means of GPS. Due to the heterogeneous weather conditions when taking the ground samples, a new sampling approach was necessary, and it occurred with the division of the sample in four settings, which were: setting 1 (clear sky and mildly windy), setting 2 (clear sky and windy), setting 3 (overcast sky and mildly windy) and setting 4 (overcast sky and windy). The correlation analyses among all the available data for the research were conducted separately for the four settings. The spectral curves of points belonging to each setting were treated with the techniques of continuum removal and ratio and spectral difference. The multispectral Ikonos image was subjected to techniques of processing and analyses of multispectral images, as well as the technique of spectral ratio applied to the bands. Correlation analyses to all data collected (limnological variables and spectral curves) and the multispectral image were applied and for the correlated data, methods of classical linear regression were applied to the sample, generating empirical models of inference of the limnological variables: Transparency, Secchi Depth, TSS, Turbidity and Electrical Conductivity. At last, the spatial distribution was conducted to the variables Transparency of the water, from Secchi Depth and Turbidity, which inference used data extracted from multispectral images. The results demonstrated the applicability of the proposed method, once it was possible to infer and conduct the spatial distribution from the multispectral image for the limnological variables Transparency, for the sample setting 3 and Turbidity, for the sample setting 4. The two inference models, as well as the others (Log(TSS) and Log(Turbidity) for setting 2; Electrical Conductivity for setting 3 and TSS for setting 4) generated in this research, were statistically evaluated and accepted by the adapted method

“jackknife”. The objectives were reached and the research presented an analytical method for limnological variables (Transparence, TSS, Turbity and Electrical Conductivity) related to its spectral characteristic and quality water of Itupararanga reservoir, which can be used in other reservoirs, as long as specific characteristics are observed.

**Keywords:** Remote Sensing of water, statistical inference, spatial high resolution images, spatial distribution of limnological variables, optically active components

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de absorção e espalhamento da luz na água pura.....	27
Figura 2 - Porcentagem de reflectância da água limpa e água com ocorrência de algas.....	28
Figura 3 - Curvas de reflectância com diferentes concentrações de sólidos em suspensão.....	31
Figura 4 (a e b) – Curvas de reflectância com diferentes concentrações de clorofila.....	33
Figura 5 – Porcentagem de reflectância de água com alga e com concentrações variáveis de sedimentos em suspensão.....	35
Figura 6 – Definição de parâmetros de uma banda de absorção normalizada pela técnica de remoção do contínuo, medidas (posição, profundidade, largura e assimetria....	38
Figura 7 – Esquema apresentando bandas de absorção assimétricas.....	39
Figura 8 – Localização da área de estudo no estado de São Paulo.....	46
Figura 9 – Mapa de cobertura do solo do entorno do Reservatório de Itupararanga.....	48
Figura 10 – Fluxograma de atividades.....	53
Figura 11 – Classificação não-supervisionada do reservatório de Itupararanga/SP, gerada para a imagem CCD/CBERS de fevereiro de 2005 (período de cheia).....	60
Figura 12 – Classificação não-supervisionada do reservatório de Itupararanga/SP, gerada para a imagem CCD/CBERS de janeiro de 2006 (período de cheia).....	60
Figura 13 - Classificação não-supervisionada do reservatório de Itupararanga/SP, gerada para a imagem ETM+/Landsat de maio de 2003 (período de seca).....	61
Figura 14 - Classificação não-supervisionada do reservatório de Itupararanga/SP, gerada para a imagem TM/Landsat de maio de 1985 (período de seca).....	61
Figura 15 - Imagem resultante da sobreposição das duas imagens referentes ao <i>período de cheia</i> para o reservatório de Itupararanga/SP, com a redistribuição dos pontos amostrais.....	63
Figura 16 - Imagem resultante da sobreposição das duas imagens referentes ao <i>período de seca</i> para o reservatório de Itupararanga/SP, com a redistribuição dos pontos amostrais.....	64
Figura 17 – Mapa do reservatório de Itupararanga, com a hidrografia e a localização geográfica dos pontos definidos na amostragem.....	65
Figura 18 - Marco geodésico implantado como base em Piedade/SP.....	66
Figura 19 - Lancha com pessoal, GPS 4600 e equipamentos de coleta de dados “in situ”..	66
Figura 20 - Curvas das coordenadas N posicionadas nos pontos amostrais com os receptores de precisão e de navegação.....	68
Figura 21 - Curvas das coordenadas e posicionadas nos pontos amostrais com os receptores de precisão e de navegação.....	69
Figura 22 – Detalhe do posicionamento relativo estático dos pontos, mostrando arraste da embarcação, devido a fortes ventos e chuva.....	70
Figura 23 – Análise de Correlação entre as curvas espectrais dos 35 pontos coletados “in situ” e as variáveis limnológicas.....	74
Figura 24 - Curvas Espectrais da água do Reservatório de Itupararanga/SP.....	78
Figura 25 - Suavização por média móvel e transformada de Fourier aplicada às curvas espectrais do ponto 28.....	79
Figura 26 - Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 28.....	80
Figura 27 - Curvas Espectrais suavizadas para as 35 amostras de campo.....	80
Figura 28 - Reflectância dos pontos referentes ao conjunto 1.....	82

Figura 29 - Reflectância dos pontos referentes ao conjunto 2.....	83
Figura 30 - Reflectância dos pontos referentes ao conjunto 3.....	84
Figura 31 - Reflectância dos pontos referentes ao conjunto 4.....	86
Figura 32 - Espectros médios máximos e mínimos para cada um dos quatro conjuntos, calculados a partir da aplicação da primeira derivada.....	87
Figura 33 - Espectros do Contínuo removido para os quatro conjuntos da amostra (a) Conjunto 1, n = 3; (b) Conjunto 2, n = 10; (c) Conjunto 3, n = 12; (d) Conjunto 4, n = 10.	89
Figura 34 - Imagem Ikonos II - fevereiro de 2007 - Composição colorida: B1 (azul), B2 (verde) e B3 (vermelho).....	93
Figura 35 - Imagem Ikonos II - março de 2007 - Composição colorida: B1 (azul), B2 (verde) e B3 (vermelho).....	94
Figura 36 - Recorte do corpo d'água após aplicação da máscara, para o reservatório de Itupararanga/SP, com os pontos amostrais. Composição colorida: B1 (azul), B2 (verde) e B3 (vermelho).....	96
Figura 37 - Recorte do corpo d'água, após aplicação da máscara, referente à parte oeste do reservatório de Itupararanga/SP, com os pontos amostrais. Composição colorida: B1 (azul), B2 (verde) e B3 (vermelho).....	97
Figura 38 - Parâmetros necessários à aplicação do modelo de correção atmosférica baseado no método DOS do aplicativo Idrisi.....	99
Figura 39 - Coeficiente de Correlação entre as variáveis limnológicas e <i>razões de banda</i> para o conjunto 2 (n = 10).....	103
Figura 40 - Coeficiente de Correlação entre as v. limnológicas e <i>diferenças de banda</i> para o conjunto 2 (n = 10).....	103
Figura 41 - Coeficiente de Correlação entre as v. limnológicas e <i>razões de banda</i> para o conjunto 3 (n = 12).....	104
Figura 42 - Coeficiente de Correlação entre as v. limnológicas e <i>diferenças de banda</i> para o conjunto 3 (n = 12).....	105
Figura 43 - Coeficiente de Correlação entre as variáveis limnológicas e <i>razões de banda</i> para o conjunto 4 (n = 10).....	105
Figura 44 - Coeficiente de Correlação entre as variáveis limnológicas e <i>diferenças de banda</i> para o conjunto 4 (n = 10).....	106
Figura 45 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros do contínuo removido e as concentrações das variáveis limnológicas, para o conjunto 1.....	108
Figura 46 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros do contínuo removido e as concentrações das variáveis limnológicas, para o conjunto 2.....	109
Figura 47 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros do contínuo removido e as concentrações das variáveis limnológicas, para o conjunto 3.....	109
Figura 48 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros do contínuo removido e as concentrações das variáveis limnológicas, para o conjunto 4.....	110
Figura 49 - Coeficiente de correlação entre as variáveis limnológicas e as bandas espectrais da imagem multiespectral Ikonos – fevereiro 2007, para o conjunto 3.....	112
Figura 50 - Coeficiente de correlação entre as variáveis limnológicas e as bandas espectrais da imagem multiespectral Ikonos – fevereiro 2007, para o conjunto 4.....	113
Figura 51 - Coeficiente de Correlação entre razões de bandas aplicadas à Imagem Multiespectral Ikonos de fevereiro 2007 e as variáveis limnológicas, para o conjunto 3....	115
Figura 52 - Coeficiente de Correlação entre razões de bandas aplicadas à Imagem Multiespectral Ikonos de fevereiro 2007 e as variáveis limnológicas, para o conjunto 4....	117

Figura 53 - Gráficos dos resíduos padronizados do modelo para TSS do conjunto 2 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados.....	125
Figura 54 - Análise dos Resíduos do modelo para Turbidez do conjunto 2 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados.....	129
Figura 55 - Gráficos dos resíduos do modelo para Condutividade Elétrica do conjunto 3 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados.....	133
Figura 56 - Gráficos dos resíduos do modelo para TSS do conjunto 4 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados.....	138
Figura 57 – Distribuição espacial da concentração de Profundidade de Secchi estimada a partir da razão de bandas B4 e B1 da imagem Ikonos de fevereiro de 2007 para o Reservatório de Itupararanga/SP.....	140
Figura 58 - Distribuição espacial da concentração de Profundidade de Secchi estimada a partir da razão de bandas B4 e B1 da imagem Ikonos de março de 2007.....	141
Figura 59 - Gráficos dos resíduos para TSS do conjunto 4 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados.....	144
Figura 60 - Gráficos dos resíduos para Turbidez (modelo 1) do conjunto 4 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados.....	148
Figura 61 - Gráficos dos resíduos para Turbidez (modelo 2) do conjunto 4 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados.....	151
Figura 62 – Distribuição espacial da concentração de Turbidez estimada a partir da razão de bandas B3 e B2 da imagem Ikonos de fevereiro de 2007 para o Reservatório de Itupararanga/SP.....	153
Figura 63 – Distribuição espacial da concentração de Turbidez estimada a partir da razão de bandas B3 e B2 da imagem Ikonos de março de 2007.....	154

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Locais espectrais de absorção por pigmentos.....	32
Tabela 2 - Características técnicas da imagem e do satélite Ikonos II.....	42
Tabela 3 - Intervalos espectrais das bandas para os sensores Ikonos, CCD/Cbers e TM e ETM/Landsat.....	58
Tabela 4 - Síntese das estatísticas descritivas para as variáveis limnológicas coletadas.....	71
Tabela 5 - Correlações entre as variáveis limnológicas.....	72
Tabela 6 - Amostras e condições do tempo no levantamento de campo - Reservatório de Itupararanga/SP.....	76
Tabela 7 - Classificação da amostra segundo as condições meteorológicas.....	77
Tabela 8 - Impacto da suavização sobre as medidas do <i>ponto 28</i> .....	79
Tabela 9 - Parâmetros limnológicos referentes ao conjunto 1.....	82
Tabela 10 - Parâmetros limnológicos referentes ao conjunto 2.....	83
Tabela 11 - Parâmetros limnológicos referentes ao conjunto 3.....	85
Tabela 12 - Parâmetros limnológicos referentes ao conjunto 4.....	86
Tabela 13 - Intervalos definidos para as feições de absorção para cada conjunto de dados e Comprimento de onda ( $\lambda$ ) central de cada banda.....	88
Tabela 14 - Parâmetros das bandas de absorção do contínuo removido para cada conjunto	90
Tabela 15 - Cálculo da radiância aparente para as imagens Ikonos.....	98
Tabela 16 - Metadados das Imagens Multiespectrais Ikonos.....	100
Tabela 17 - Características da banda espectral Ikonos.....	100
Tabela 18 - Matriz de correlação entre as bandas do Ikonos fevereiro de 2007 ( $\alpha = 5\%$ )....	111
Tabela 19 - Correlação entre as bandas Ikonos para os 11 pontos do conjunto 3.....	112
Tabela 20 - Correlação entre as bandas Ikonos para os 10 pontos do conjunto 4.....	113
Tabela 21 - Correlações entre as razões de bandas do Ikonos, para o conjunto 3.....	114
Tabela 22 - Correlações entre as razões de bandas do Ikonos para o conjunto 4.....	116
Tabela 23 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “ <i>Best Subsets</i> ” para TSS, Conjunto 2.....	122
Tabela 24 - Estatísticas da Análise de Regressão Múltipla.....	123
Tabela 25 - Análise dos resíduos.....	125
Tabela 26 - Intervalo de Predição (IP) para Log (TSS) a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.....	126
Tabela 27 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “ <i>Best Subsets</i> ” para Turbidez conjunto 2.....	127
Tabela 28 - Análise de Regressão.....	127
Tabela 29 - Análise de Regressão para o modelo final.....	138
Tabela 30 - Análise dos resíduos.....	129
Tabela 31 - Intervalo de Predição (IP) para Turbidez a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.....	130
Tabela 32 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “ <i>Best Subsets</i> ” para Condutividade Elétrica, Conjunto 3.....	131
Tabela 33 - Análise de Regressão.....	132
Tabela 34 - Análise dos resíduos.....	133
Tabela 35 - Intervalo de Predição (IP) para Condutividade Elétrica a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.....	134

Tabela 36 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “ <i>Best Subsets</i> ” para Profundidade de Secchi Conjunto 3.....	137
Tabela 37 - Análise de Regressão.....	137
Tabela 38 - Análise dos resíduos.....	138
Tabela 39 – Intervalo de Predição (IP) para Profundidade de Secchi a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.....	139
Tabela 40 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “ <i>Best Subsets</i> ” para TSS, Conjunto 4.....	142
Tabela 41 - Análise de Regressão .....	143
Tabela 42 - Análise dos resíduos.....	144
Tabela 43 - Intervalo de Predição (IP) para TSS a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.....	145
Tabela 44 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “ <i>Best Subsets</i> ” para Turbidez, Conjunto 4.....	146
Tabela 45 – Análises de Regressão dos três modelos selecionados aparentemente como adequados para inferência de Turbidez.....	147
Tabela 46 – Análise dos Resíduos.....	148
Tabela 47 – Análise de Regressão Múltipla pelo método “ <i>Best Subsets</i> ” para Turbidez (segundo modelo), conjunto 4, utilizando as bandas da imagem Ikonos.....	149
Tabela 48 – Fatores de Inflação (VIF) para o modelo de inferência de Turbidez (modelo 2).....	150
Tabela 49 – Análise dos Resíduos.....	151
Tabela 50 – Intervalos de Predição (IP) para Turbidez a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.....	152
Tabela 51 - Resumo dos modelos empíricos de inferência gerados para cada conjunto.....	155

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos.....	19
1.2	Apresentação do Trabalho.....	20
2	ESTADO DA ARTE: SENSORIAMENTO REMOTO E QUALIDADE DA ÁGUA.....	21
3	SENSORIAMENTO REMOTO DE AMBIENTES AQUÁTICOS.....	26
3.1	Análise de curvas espectrais dos principais componentes opticamente ativos presentes nos corpos d'água.....	29
3.2	Métodos de Análise de medidas espectrorradiométricas.....	35
3.2.1	Remoção do Contínuo.....	36
3.2.2	Razão e Diferença espectral.....	40
3.3	Tratamento e Análise de Imagens Multiespectrais.....	41
3.3.1	Pré-processamentos (Correção Radiométrica e Atmosférica).....	43
4	ESTUDO DE CASO.....	45
5	MATERIAL E MÉTODO.....	49
5.1	Material e Equipamentos.....	49
5.1.1	Aplicativos Computacionais.....	49
5.2	Método.....	52
6	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISES.....	56
6.1	Levantamento “in situ”.....	56
6.1.1	Delineamento Amostral.....	57
6.1.2	Posicionamento Geodésico.....	65
6.1.3	Coleta de dados limnológicos.....	70
6.1.4	Coleta de dados espectrais.....	73
6.2	Dados Espectrais: classificação da amostra segundo as condições do tempo.....	74
6.2.1	Suavização dos dados espectrais.....	77
6.2.2	Análise Exploratória da influência das condições do tempo nas medidas espectrais da água.....	81
6.2.3	Razão e Diferença de bandas.....	87
6.2.4	Remoção do Contínuo.....	88
6.3	Tratamento e Análise das Imagens Multiespectrais.....	91
6.3.1	Georreferenciamento das cenas.....	95
6.3.2	Exclusão da área externa ao corpo d'água.....	95
6.3.3	Correções Radiométrica e Atmosférica.....	98
6.3.4	Extração dos valores de reflectância aparente.....	101
6.3.5	Razão de bandas.....	101
7	ANÁLISES DE CORRELAÇÃO.....	102
7.1	Correlações entre as variáveis limnológicas e os valores resultantes de razão e diferença de bandas aplicadas aos dados espectrais.....	102
7.2	Correlações entre as variáveis limnológicas e os parâmetros do contínuo removido.....	108
7.3	Correlações entre as variáveis limnológicas e os valores de reflectância aparente das bandas do Ikonos de fevereiro de 2007.....	111
7.4	Correlações entre as variáveis limnológicas e os valores resultantes da razão de bandas do Ikonos de fevereiro de 2007.....	114

8	MODELOS EMPÍRICOS PARA INFERÊNCIA DOS COMPONENTES DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA.....	118
8.1	Modelos Empíricos para inferência de Sólidos em Suspensão (TSS) e Turbidez para o conjunto 2 (céu aberto e vento médio).....	122
8.2	Modelo Empírico para inferência de Condutividade Elétrica e Profundidade de Secchi para o conjunto 3 (céu nublado e vento fraco).....	131
8.3	Modelos Empíricos para inferência de Sólidos em Suspensão (TSS) e Turbidez para o conjunto 4 (céu nublado e ventos médios a fortes).....	142
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	156
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
	APÊNDICE A – VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS COLETADAS “IN SITU” .....	172
	APÊNDICE B – SUAUIZAIÇÃO DAS CURVAS DE FATOR DE REFLECTÂNCIA (FR) APLICANDO FILTORS LINEARES DE MÉDIA MÓVEL E TRANSFORMADA DE FOURIER.....	175
	APÊNDICE C – EXTRAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE PARA AS IMAGENS MULTIESPECTRAIS IKONOS DE FEVEREIRO E MARÇO DE 2007.....	203

## 1 INTRODUÇÃO

“A água é muito mais do que um recurso natural. Ela é uma parte integral do nosso planeta. Está presente há bilhões de anos, e é parte da dinâmica funcional da natureza” (E. C. PIELOU, 1998).

Desde as últimas décadas do século XX até os dias atuais, as questões relativas à contaminação de recursos hídricos e a sua escassez, têm ocupado um papel de destaque em fóruns de discussões envolvendo tanto comunidades regionais e nacionais, quanto internacionais. Especialistas traçaram um quadro alarmante para um futuro bem próximo com relação à escassez de água potável no planeta Terra. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), até 2015, a água deixará de ser uma "dádiva divina" para se tornar uma mercadoria valiosa.

Os Estados membros das Nações Unidas traçaram no ano de 2003, considerado o Ano Internacional da Água, como um dos objetivos para o Desenvolvimento do Milênio, que até 2015 devem “reduzir pela metade a proporção de pessoas que não têm acesso à água potável de qualidade.” E, na reunião de Johannesburgo, também em 2003, concordaram que até essa data “deverão ser reduzidas à metade a proporção de pessoas sem acesso ao saneamento básico”(TUNDISI, 2003).

Essas discussões demonstram o grau de degradação por que vem passando o globo terrestre nas últimas décadas, e apresentam um conflito de questões a serem investigadas para um melhor planejamento de ações relacionadas à qualidade e quantidade de água. Assim, pesquisas científicas voltadas à disponibilidade e qualidade de águas mostram-se fundamentais nos dias de hoje, preparando diagnósticos e apontando soluções para tomadores de decisões.

Para Tundisi (2003), a história da água sobre o planeta Terra é complexa e está diretamente relacionada ao crescimento da população humana, ao grau de urbanização e aos usos múltiplos que afetam sua quantidade e qualidade; além de estar relacionada à saúde, pois muitas doenças que afetam a espécie humana têm veiculação hídrica ou se desenvolvem na água

Na natureza, segundo Odum (2008), podem ser encontrados dois tipos de ambientes aquáticos, categorizados quanto à velocidade da água e vazão: ambientes lênticos,



de lênis, “calmo”, que são os lagos e lagoas e ambientes lóticos, de lotus, “lavado”, caracterizados pelas fontes, riachos e rios.

Os reservatórios são definidos como ambientes intermediários entre rios e lagos, onde se pode observar um contínuo das características limnológicas no sentido rio-barragem (PAGIORO, 1999). O movimento e a mistura de matéria dissolvida e particulada é resultado de uma grande quantidade de complexos mecanismos físicos, altamente interdependentes.

Projetados geralmente para gerar energia elétrica, os reservatórios têm sido utilizados para inúmeras outras finalidades, incluindo lazer, captação de água, navegação e irrigação, entre outros. Um uso pouco nobre e cada vez mais freqüente tem sido o de depositário de rejeitos, recebendo tanto esgotos domésticos, que contribuem com elevadas cargas orgânicas, quanto efluentes industriais que contribuem com uma série de compostos sintéticos, metais pesados e plásticos (LIBOS, 2002). Nesse sentido, a qualidade da água é alterada e seu consumo é afetado, o que gera a necessidade de tratamento.

As atividades agrícolas que ocorrem no entorno das bacias hidrográficas também colaboram para a alteração da qualidade da água, devido ao uso excessivo de pesticidas e fertilizantes que são carreados para os rios.

Pereira Filho (2000) considera que os fenômenos presentes na bacia hidrográfica são registrados em parte pela água, tornando-se um desafio identificar as relações entre os sistemas aquáticos e terrestres. Segundo o autor, as variáveis limnológicas são fortemente relacionadas com as variáveis da superfície terrestre, tais como: relevo, vegetação, geologia e impactos antrópicos.

Partindo-se, então, do pressuposto de que a qualidade da água está fortemente condicionada à ocupação antrópica no entorno dos corpos d'água, especificamente relacionadas com a poluição lançada nos mesmos, a erosão urbana e agrícola, e a sedimentação que ocorre nas margens e nas áreas de ingresso de tributários nos reservatórios, entre outros, é evidente a necessidade de avaliar esses condicionantes antes de se pensar em manejo integrado do corpo d'água.

Sabendo-se que nos reservatórios as características de qualidade da água ocorrem de modo complexo e interdependente ao longo de sua extensão, observa-se que o número de amostras levantadas em pesquisas limnológicas tradicionais, muitas vezes não é suficiente para uma análise estatística robusta das correlações entre essas variáveis. Além



disso, muitos dos trabalhos, ao enfatizarem a dinâmica do ambiente, subestimam a variabilidade espacial. Por outro lado, órgãos oficiais responsáveis pela qualidade da água de rios e bacias hidrográficas, que deveriam realizar uma análise bastante minuciosa, monitoram em geral poucos pontos. É o caso da CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, do Estado de São Paulo, que monitora apenas dois pontos amostrais no Reservatório de Itupararanga/SP, área de estudo da pesquisa, cujo canal principal apresenta uma extensão de 26 Km e margens de 192,88 Km.

Portanto, pretendeu-se nessa pesquisa apresentar um esquema de amostragem de parâmetros de qualidade de água que contemplasse um número suficiente de estações amostrais, garantindo ao mesmo tempo sua representatividade espacial, baseado na variabilidade espectral do corpo d'água. Para isso, foram realizadas análises temporais de imagens multiespectrais tomadas em quatro datas distintas.

A área de estudo para aplicação da proposta foi o Reservatório de Itupararanga-SP, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Sorocaba, por ser um dos maiores mananciais de água potável da região de Sorocaba, abastecendo os municípios de Sorocaba, Votorantim, Mairinque, Alumínio, Ibiúna e São Roque, num total de aproximadamente 800.000 habitantes, e considerado de boa qualidade da água. Além do fato desse reservatório ser uma das áreas de estudo dos pesquisadores da Faculdade de Ciências Agrárias da Unesp de Botucatu, que deram suporte técnico e apoio científico à pesquisa e levantamento de campo.

No levantamento de campo foram obtidas amostras de variáveis limnológicas, aqui representadas por Sólidos em Suspensão – TSS, Turbidez, Condutividade Elétrica e Transparência, e dados espectrais da camada superficial da água com a utilização do equipamento espectrorradiômetro FieldSpec UV/VNIR (*Analytical Spectral Devices, Inc.*) de propriedade do Inpe – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e disponibilizado para uso nesta pesquisa. Uma avaliação da correlação entre esses dados (variáveis limnológicas e curvas espectrais) tomados “in situ” foi realizada. Este trabalho foi possível devido à pesquisa de doutorado em questão estar incluída no Projeto PROCAD – que envolve três instituições de pesquisa, sendo: FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Unesp – Presidente Prudente, UFSM - Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, RS e INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, e que prevê intercâmbios entre pesquisadores de pós-graduação, realização de pesquisas e trabalhos de campo, além da publicação de trabalhos científicos em conjunto.



A partir da aquisição quase simultânea de uma imagem multiespectral de alta resolução espacial do satélite Ikonos II da área de estudo, após ser submetida a técnicas de processamento e análise de imagens multiespectrais, foi realizada uma análise de correlação entre esta e os dados coletados “in situ” (variáveis limnológicas e curvas espectrais).

Para os dados correlacionados, métodos de regressão linear clássica foram aplicados à amostra, gerando modelos empíricos de inferência das variáveis limnológicas: TSS, Turbidez e Condutividade Elétrica.

O mapeamento das variáveis limnológicas, cuja inferência utilizou dados extraídos da imagem multiespectral, foi finalmente realizado, gerando um produto de fácil leitura e utilização por especialistas em ambientes aquáticos na aplicação do planejamento e controle da qualidade da água em tais ambientes.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um método de inferência de variáveis limnológicas físicas, com base em suas propriedades ópticas, para o reservatório de Itupararanga/SP.

Para tanto, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Definir um esquema de amostragem que considere um número adequado de elementos amostrais, de modo a viabilizar uma otimização do levantamento de campo e garantir, ao mesmo tempo, a representatividade espacial dos dados limnológicos coletados;
- Avaliar a correlação entre variáveis limnológicas (Sólidos em Suspensão - TSS, Turbidez, Condutividade Elétrica e Transparência) e dados espectrais medidos “in situ”, nos pontos definidos pelo esquema de amostragem, devidamente posicionados com receptores GPS;
- Realizar uma análise de correlação entre os dados coletados “in situ” (variáveis limnológicas e curvas espectrais) e imagem multiespectral de alta resolução espacial e radiométrica do satélite Ikonos II da área de estudo, tomada quase simultaneamente ao levantamento de campo;



- Aplicar métodos de regressão linear clássica, a fim de gerar modelos empíricos de inferência das variáveis limnológicas que apresentarem correlação com os dados espectrais e com os dados extraídos da imagem multiespectral;
- Realizar a distribuição espacial das variáveis limnológicas, cuja inferência foi possibilitada pelos dados extraídos da imagem multiespectral.

## 1.2 Apresentação do Trabalho

O trabalho subdivide-se em oito capítulos: a Introdução e objetivos; a Fundamentação Teórica, que inclui dois capítulos, O Estado da arte: Sensoriamento Remoto e Qualidade da Água, e Sensoriamento Remoto de Ambientes Aquáticos; o Estudo de Caso; o Material e Método; o Desenvolvimento Experimental e Análises; os Resultados e Análises Obtidos e, por fim, as Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros.

Na Introdução descreve-se a pesquisa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

A Fundamentação Teórica apresenta uma análise do estado da arte em sensoriamento remoto e qualidade da água, discutindo alguns dos principais trabalhos científicos publicados na atualidade sobre o tema; além de apresentar conceitos e técnicas do sensoriamento remoto de ambientes aquáticos.

O capítulo 4, Estudo de Caso, apresenta a área de aplicação do método proposto e o capítulo 5, Material e Método, descreve o material utilizado no trabalho, além do método adotado para a realização do mesmo.

No capítulo 6, Desenvolvimento Experimental e Análises, descreve-se desde a etapa de planejamento do levantamento de dados em campo, o levantamento propriamente dito e aquisição da imagem multiespectral de alta resolução espacial. As análises de correlação realizadas entre os dados são apresentadas no capítulo 7.

Os modelos empíricos de inferência para as variáveis limnológicas correlacionadas são apresentados e discutidos no capítulo 8.

O capítulo 9 descreve as Conclusões e Recomendações para trabalhos futuros.



## 2 ESTADO DA ARTE: SENSORIAMENTO REMOTO E QUALIDADE DA ÁGUA

Água é uma série infinitamente variável de soluções aquosas de diferentes substâncias ou compostos químicos presentes na superfície do solo terrestre, que, dependendo da natureza e da concentração, pode ser benéfica, aceitável ou imprópria ao emprego que dela se pretende fazer (BRANCO e ROCHA, 1977).

O conceito de qualidade da água é muito mais abrangente do que simplesmente caracterizá-la pela fórmula molecular  $H_2O$ . A água incorpora a si diversas impurezas que definem a qualidade da água, devido às suas propriedades de solvente e à sua capacidade de transportar partículas (VON SPERLING, 1996). De um modo geral pode-se dizer que a qualidade de uma determinada água é função do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica.

Já a qualidade desejável para uma determinada água é função do seu uso previsto, que pode ser: abastecimento doméstico ou industrial, irrigação, dessedentação de animais, aqüicultura, preservação da flora e fauna, recreação e lazer, harmonia paisagística, geração de energia elétrica, navegação e diluição de despejos. De um modo geral, apenas os dois primeiros usos estão frequentemente associados a um tratamento prévio da água, devido aos requisitos de qualidade mais exigentes.

Di Bernardo et al. (2002) consideram que a poluição, para os ecólogos em geral, decorre de qualquer alteração de natureza física, química, biológica ou mesmo de regime hidrológico, que produza desequilíbrios no ciclo biológico normal, alterando a composição da fauna e da flora do meio. Já para os sanitaristas, a poluição de um recurso hídrico resulta, principalmente, do lançamento de águas oriundas de atividades industriais, agrícolas ou humanas.

A poluição do meio aquático pode causar alterações nas características físicas, químicas ou biológicas da água, e por isso há necessidade de se estabelecer requisitos ou padrões de qualidade, os quais dependerão do uso a que se destina a água.

Os diversos componentes presentes na água, e que alteram o seu grau de pureza, podem ser retratados em termos das suas características físicas, químicas e biológicas (VON SPERLING, 1996). As principais características da água podem ser expressas como:



- Características físicas: são as impurezas associadas, em sua maior parte, aos sólidos presentes na água. Tais sólidos podem ser em suspensão, coloidais ou dissolvidos, dependendo do seu tamanho;
- Características químicas: matéria orgânica ou inorgânica;
- Características biológicas: são os seres presentes na água, que podem ser vivos ou mortos. Dentre os seres vivos, tem-se os pertencentes aos reinos animal e vegetal, além dos protistas.

A qualidade da água pode se representada através de diversos parâmetros, que traduzem as suas principais características físicas, químicas e biológicas (VON SPERLING, 1996). Alguns desses parâmetros, definidos na presente pesquisa como indicativos da qualidade da água e ao mesmo tempo associados à sua característica espectral, são definidos a seguir.

A Turbidez de um corpo d'água é um parâmetro físico definido como o grau de redução ou interferência que a luz sofre, ao atravessar a água, conferindo uma aparência turva à mesma. Sua forma principal é de sólidos em suspensão originários naturalmente de partículas de rocha, argila e silte, além das algas e outros microorganismos. Não traz inconvenientes sanitários diretos, porém, é esteticamente desagradável na água potável, e os sólidos em suspensão podem servir de abrigo para microorganismos patogênicos. Sua origem antropogênica é devida a despejos domésticos, despejos industriais, microorganismos e erosão, e nestes casos podem estar associadas a compostos tóxicos e organismos patogênicos, podendo reduzir a penetração da luz, prejudicando a fotossíntese. A unidade de medida é uT ou UNT (Unidade de Turbidez – unidade de Jackson ou Nefelométrica) (VON SPERLING, 1996)

A Condutividade Elétrica indica que a quantidade total de material ionizado na água é um fator determinante do desenvolvimento da biomassa fitoplanctônica. O bicarbonato é um dos principais íons associados a essa variável, que representa um elemento estimulador das taxas fotossintéticas. Eventos como anoxia e ventos, que ressuspendem o sedimento, podem contribuir para o aumento da condutividade elétrica (THOMAZ et al., 2003 apud ROCHA, 2003). Um outro evento que pode contribuir para o aumento da condutividade elétrica na planície de inundação é o aporte de nutrientes existente nas margens das lagoas, devido às oscilações do nível hidrométrico ou carregado através das chuvas (Rocha, 2003).



Assim, pode-se relacionar o aumento da condutividade elétrica ao aumento da disponibilidade de nutrientes no corpo d'água, o que influencia diretamente a biomassa fitoplanctônica. A unidade de medida é  $\mu\text{S/cm}$  (microSiemens por centímetro).

A Transparência do corpo d'água é obtida através da profundidade do disco de Secchi, que se dá através da observação do desaparecimento de um disco branco mergulhado na água. A leitura da profundidade é feita em uma corda fixada ao disco, graduada em metros. O valor do disco de Secchi expressa uma relação direta com a transparência da água, sendo que quanto menor for a transparência da água, menor será a profundidade em que é possível a visualização do disco, devido à maior dispersão da luz. Por outro lado, a profundidade do disco de Secchi é inversamente proporcional à quantidade de compostos no percurso da luz e ao coeficiente de atenuação da irradiância (PEREIRA FILHO, 2000).

Desde que dados espectrais medidos com espectrorradiômetros ou registrados em imagens tomadas por sensores instalados em plataformas aéreas ou orbitais tornaram-se disponíveis, foram relatadas tentativas de correlacionar a resposta espectral com a ocorrência de componentes que indiquem a qualidade da água em grandes reservatórios. Com a disponibilidade das imagens do sensor Thematic Mapper - TM/Landsat, foram realizados experimentos para verificar se o aumento na resolução espacial dessas imagens permitiria estimar a concentração dos componentes individuais da água. No entanto, conforme salienta Novo et al.(1994), a maior limitação desses dados está em sua resolução espectral inadequada para estudos da água, a qual não permite discriminar componentes opticamente ativos, principalmente quando ocorrem simultaneamente altas concentrações de clorofila e material inorgânico.

Mais recentemente, Ritchie et al. (2003) reafirmam que, apesar da sensação atual de que a tecnologia de sensoriamento remoto tenha aplicações reais e potenciais para avaliar recursos aquáticos e monitorar a qualidade da água, limitações nas resoluções espacial e espectral dos sistemas sensores orbitais, têm restringido a utilização de imagens de satélite em aplicações diretamente relacionadas com o monitoramento da qualidade da água. No entanto, com a disponibilidade de imagens orbitais adquiridas por sensores de alta resolução espacial, assim como a crescente utilização de câmaras multiespectrais instaladas em aeronaves, a questão da resolução espectral das imagens continua sendo a grande restrição ao seu uso, de modo que a maioria dos estudos sobre qualidade da água, utilizando o



sensoriamento remoto, têm se limitado à detecção de particulados em suspensão (NOVO et al., 1989) e da vegetação aquática em grandes reservatórios (GALO et al., 2002; GALO et al., 2004).

Barbosa (2005) considera que a disponibilidade atual de dados de Sensoriamento Remoto em várias resoluções temporais, espaciais e espectrais, inclusive com dados históricos de quase 30 anos, para o caso do sistema sensor TM/Landsat 5, permite propôr o desenvolvimento de metodologias para monitorar e compreender sistemas ambientais que façam uso dessa tecnologia. Para tanto, o autor baseou sua pesquisa na hipótese de que a variação espaço-temporal de massas de água opticamente distintas presentes na planície de inundação amazônica poderia ser analisada através de imagens ópticas adquiridas em diferentes níveis da água, independentemente do ano de aquisição, uma vez que a circulação da água na planície é comandada pelo chamado “pulso de inundação” do rio Amazonas, que é cíclico. Para isso, integrou informações de diferentes naturezas: sensoriamento remoto, dados espectrorradiométricos e limnológicos adquiridos em campo, ao longo de um ciclo hidrológico. O autor definiu quatro estados relevantes para aplicar a hipótese pesquisada, que foram: períodos de cheia, vazante, água baixa e enchente, característicos das águas dessa região. Foram realizadas cinco campanhas de campo para a coleta de dados limnológicos, espectrais e batimétricos, numa média de 200 amostras.

Nos processamentos realizados por Barbosa (2005), foi detectado que a turbidez é um indicador altamente significativo da concentração de Total de Sólidos em Suspensão - TSS. O autor concluiu também que a integração dos dados permitiu a identificação dos processos básicos que controlam a circulação e a qualidade das massas de água na planície ao longo do ciclo hidrológico. Por exemplo: dados limnológicos permitiram caracterizar a dinâmica de composição da água, enquanto os espectrais permitiram observar os efeitos dessa dinâmica na resposta espectral das massas de água. O conjunto de imagens orbitais permitiu delimitar as diferentes massas homogêneas de água que foram posteriormente caracterizadas pelos dados limnológicos e espectrais.

Reis et al. (2003) pesquisaram a correlação entre dados espectrais, provenientes do satélite Landsat, e levantados “in situ”, para o mapeamento da variação das concentrações de material em suspensão em reservatórios do sub-médio São Francisco, na região semi-árida brasileira. Para isso, os dados de campo foram coletados trimestralmente em



23 estações distribuídas no corpo central, braços e afluentes de quatro reservatórios, onde as amostras foram tomadas na superfície, meio e fundo da coluna d'água, em cada estação.

A metodologia considerou a transformação dos valores de nível digital em valores de reflectância aparente, utilizando o programa S6 para as imagens Landsat 7 e o programa ENVI para a imagem Landsat 5. Devido a presença de nuvens não foi possível aplicar o programa S6 para a correção dos efeitos atmosféricos, o que foi realizado pelo método do histograma, através da subtração do valor do nível digital mínimo da cena em cada banda.

Os resultados obtidos mostraram baixas concentrações de material em suspensão, com médias na coluna d'água variando entre 0,4 e 11 mg/l. Observou-se a influência da precipitação no aumento de material em suspensão nos reservatórios pesquisados.

Das três imagens Landsat que puderam ser adquiridas no período, devido a alta cobertura de nuvens, verificou-se que os resultados obtidos para o coeficiente de correlação entre os dados espectrais e os valores de campo mostraram-se satisfatórios apenas para uma delas, não havendo correlação significativa entre as demais e os dados de campo. Uma provável causa identificada pelos autores foi devido a baixa concentração de material em suspensão observada durante as coletas para esses períodos.

A conclusão geral do trabalho indicou ser vantajosa a utilização de tecnologias como o sensoriamento remoto para inferência de parâmetros de qualidade da água, por permitirem uma visão mais ampla e com uma maior representatividade espacial dessas características.

Ekercin (2007) correlacionou os parâmetros de qualidade da água: TSS, clorofila *a* e transparência (através da profundidade do disco de Secchi), com imagens multiespectrais de alta resolução do satélite Ikonos, no mapeamento da qualidade da água de um lado na Turquia, a partir da análise em nove pontos de observação. O processamento das imagens considerou a correção radiométrica, que converteu os números digitais em valores de radiância espectral, minimizando os efeitos atmosféricos através do algoritmo *Modeler* disponível no programa de processamento de imagens ERDAS Imagine, a fim de correlacionar os parâmetros de qualidade da água e os dados do satélite, usando técnicas de regressão múltipla. Os resultados da pesquisa indicaram que os valores dos parâmetros medidos e os estimados apresentaram boa concordância, com  $R^2 = 0,97$ . A distribuição



especial dos parâmetros de qualidade da água foi realizada usando algoritmos de regressão múltipla, fornecendo informações sobre as variações na qualidade da água no lago para os tomadores de decisões ambientais.

Rundquist et al. (1996) trabalharam com assinaturas hiperespectrais no visível e infravermelho próximo para detecção de clorofila, em quantidades distintas, em dois experimentos de laboratório. Os objetivos da pesquisa foram investigar os relacionamentos básicos entre a reflectância espectral e as variações de clorofila algal, e comparar técnicas de análises na superfície das águas. As técnicas aplicadas aos dados simulados em laboratório para a inferência de clorofila foram: análise da reflectância, razão das bandas NIR/red e primeira derivada da reflectância próximo a 690 nm. As conclusões indicaram que a razão NIR/red e a primeira derivada da reflectância próximo a 690 nm foram efetivas na estimativa de concentrações de clorofila, com a seguinte diferenciação: a razão se adaptou bem a baixas concentrações de clorofila e a primeira derivada apresentou melhores resultados para altas concentrações de clorofila.

A partir das pesquisas atualmente realizadas envolvendo o sensoriamento remoto na análise da qualidade da água, verifica-se a importância da realização de estudos dessa natureza em ambientes aquáticos, a fim de se obter melhores resultados com a geração de produtos de qualidade para o diagnóstico de problemas na aplicação do planejamento ambiental.

### **3 SENSORIAMENTO REMOTO DE AMBIENTES AQUÁTICOS**

As análises ambientais realizadas por meio do sensoriamento remoto dependem da interação da radiação eletromagnética (REM) com o alvo em estudo. Quando a radiação eletromagnética incide sobre a superfície de um material, terá parte de sua energia refletida por esta superfície, parte absorvida pelos átomos ou moléculas e parte transmitida, caso a matéria possua alguma transparência no comprimento de onda da radiação (LONDE, 2008).

Para o sensoriamento remoto da água a investigação das características de um corpo d'água implica em entender como a água pura absorve ou reflete, seletivamente, a luz incidente ao longo da coluna d'água, considerando em seguida, como essa luz incidente é



afetada quando a coluna d'água contém materiais orgânicos, inorgânicos e fitoplâncton (JENSEN, 2000).

Em experimentos com a água pura, Bukata et al. (1995) resumiu em uma única figura (Figura 1) o comportamento das curvas dos coeficientes de absorção, de espalhamento e de atenuação total das moléculas de água pura nos comprimentos de onda de 250 a 800 nm.

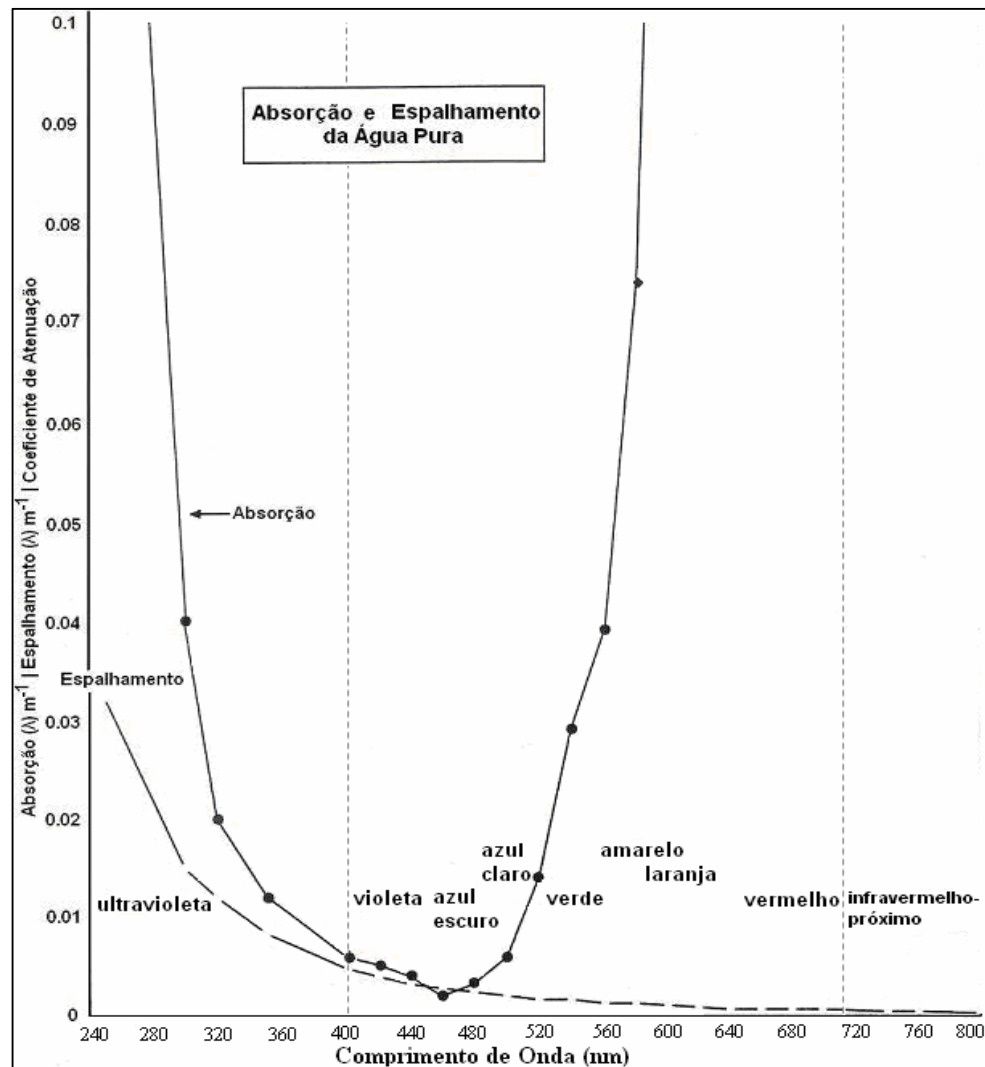


Figura 1 - Curva de Absorção e Espalhamento da luz na água pura  
Adaptado de Jensen (2000) e Bukata et al. (1995)

Segundo Bukata (1995) e Jensen (2000) a característica mais importante observada na Figura 1 é que a quantidade mínima de absorção e espalhamento da luz incidente no corpo d'água encontra-se no comprimento de onda correspondente a luz azul,



aproximadamente entre 400 e 500 nm, com o mínimo localizado entre 460 e 480 nm, região onde ocorre a maior penetração de luz na coluna d'água. Na região de comprimentos de onda entre 520 e 580 nm, correspondentes, respectivamente, à luz verde e amarela, observa-se que ocorre boa absorção e relativamente pouco espalhamento pela coluna d'água. A análise é semelhante para os comprimentos de onda entre 580 e 740 nm (luz laranja e vermelha, respectivamente) onde o espalhamento se torna insignificante quando comparado à absorção pelas moléculas de água (JENSEN, 2000). A partir de 740 nm o corpo d'água puro é absorvido com espalhamento desprezível.

Portanto, a água pura pode ser caracterizada por apresentar reflectância elevada no intervalo espectral correspondente à luz azul, diminuindo no verde, apresentando-se fraca no vermelho e quase nula no infravermelho próximo (ROBIN, 1995), como pode ser observado na curva da água limpa na Figura 2.

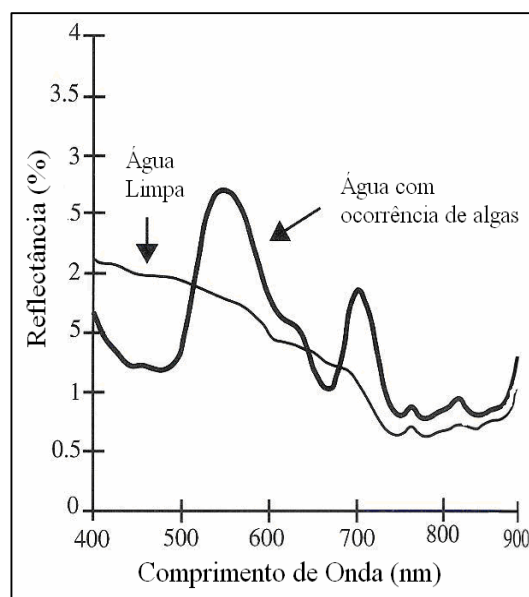


Figura 2 - Porcentagem de reflectância da água limpa e água com ocorrência de algas  
Fonte: Jensen (2000)

Na Figura 2 observa-se ainda a curva de reflectância da água com ocorrência de algas, principalmente clorofila *a*. Nessa curva, verifica-se que a presença de constituintes orgânicos (fitoplâncton, clorofila *a*) e inorgânicos (minerais suspensos) na coluna d'água acarreta alterações significativas no comportamento da reflectância da água, que apresenta absorção na região do azul, alta reflectância na região do verde, com um pico máximo em aproximadamente 550 nm, diminuindo na região do vermelho, com um pico de absorção em

aproximadamente 680 nm, e aumentando a reflectância significativamente no infravermelho próximo (aproximadamente 700 nm), diminuindo a partir daí.

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto depende, então, da habilidade do sistema sensor medir variações na radiação refletida a partir da água e relacionar tais mudanças com seus constituintes ou parâmetros que indiquem sua qualidade. Ritchie et al.(2003) afirmam que as ferramentas de sensoriamento remoto fornecem visões espaciais e temporais dos parâmetros de qualidade da água superficiais que não são avaliadas de imediato nas medidas "in situ", possibilitando monitorar efetiva e eficientemente a paisagem, identificando e quantificando os parâmetros e os problemas de qualidade da água.

### **3.1 Análise de curvas espectrais dos principais componentes opticamente ativos presentes nos corpos d'água**

Várias pesquisas para a determinação da resposta espectral de cada componente opticamente ativo presente na água foram realizadas, na tentativa de se obter uma melhor compreensão de seus comportamentos espectrais, para a definição de modelos que auxiliem na sua discriminação, dentre as quais podem-se destacar, Goodin et al. (1993); Han (1997); Kirk (1994); Dekker (1993); Rundquist et al., (1996); Quibell (1991); Jensen (2002); Bukata et al. (1995).

A reflectância espectral de cada componente opticamente ativo presente na água deve ser entendida, segundo Barbosa (2005), como sendo um somatório da interação da água com a radiação eletromagnética mais a interação do componente com a radiação eletromagnética. As curvas de reflectância para três situações distintas: curvas com diferentes concentrações de TSS, onde a fração tripton (aquela constituída por partículas inorgânicas e detritos) é dominante e a fração matéria orgânica viva (clorofila) não é representativa; curvas com diferentes concentrações de clorofila e o tripton não é representativo; e a situação com diferentes concentrações de tripton e uma concentração fixa, mas representativa de clorofila, são apresentadas a seguir.



- **Curvas de Reflectância de Sedimentos em Suspensão (TSS) – componente tripton**

O TSS – Total de Sólidos em Suspensão – é todo material particulado em suspensão na água e que não passa por um filtro de 0,45  $\mu\text{m}$ . Entre os constituintes de um corpo d'água, o TSS é o componente de maior peso no comportamento óptico da água. Consiste da matéria orgânica viva (*fitoplâncton*), da matéria orgânica morta (*detritos*) e da matéria inorgânica. A soma dos componentes matéria orgânica morta (*detritos*) e matéria inorgânica do TSS é denominada de *tripton* ou fração não algal (BARBOSA, 2005).

Com relação à absorção, o tripton comporta-se de forma semelhante às substâncias húmicas, apresentando baixa absorção na faixa do vermelho e aumento com a diminuição do comprimento de onda, ou seja, na direção do azul. Segundo Kirk (1994), esta semelhança deve-se ao fato de que estes detritos estão ligados, por adsorção, a substâncias húmicas. Por esse motivo os pigmentos fitoplanctônicos são os responsáveis pelas feições mais evidentes no espectro de absorção de TSS. Espectros de absorção do TSS sem feições bem definidas em 438 nm são provavelmente dominados por absorção pelo tripton (DEKKER, 1993).

A figura 3 apresenta a variação na resposta espectral de um corpo d'água pura em função do aumento da concentração de sedimentos em suspensão. A fração *tripton* do TSS é a componente dominante nas curvas da figura 6, e nela observa-se que com o aumento da concentração de sedimentos ocorre um aumento da reflectância na faixa entre 400 e 900 nm. Entretanto, segundo Curran e Novo (1988), a relação TSS - reflectância não pode ser definida como linear, pois é controlada por vários fatores, dentre eles as propriedades do sedimento como granulometria e composição mineralógica.



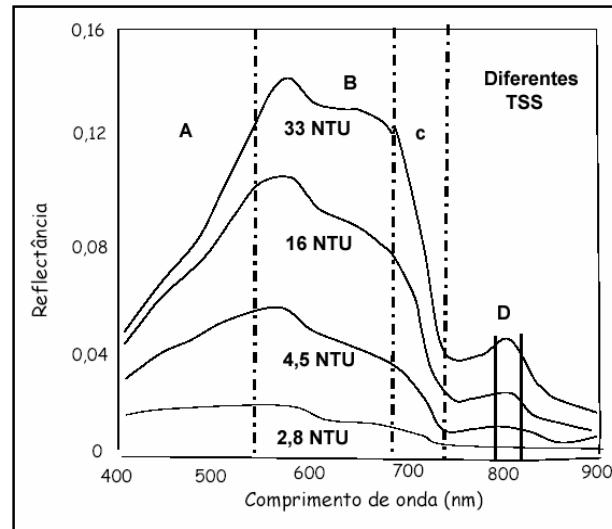


Figura 3: Curvas de reflectância com diferentes concentrações de sólidos em suspensão  
Fonte: Barbosa (2005)

Na Figura 3, pode-se verificar um crescimento *rápido* da reflectância entre 400 e 550 nm (região denominada por A na Figura), seguida por uma *alta reflectância* na faixa entre 550 e 650 nm (região denominada por B). Estas feições, segundo Barbosa (2005), estão associadas ao espalhamento devido a material particulado presente no sedimento e à baixa absorção pela água da REM. Observa-se também que ocorre um *decréscimo rápido* entre 700 e 740 nm (região denominada por C), devido ao forte aumento de absorção da água nesta região. Um pequeno pico de reflectância entre 800 e 810 nm (região denominada por D), pode ser observado, que, segundo Quibel (1991), é devido à faixa corresponder a uma região de absorção mínima da água pura, e o pico de reflectância deve-se a uma menor atenuação da REM, antes e depois de ser espalhada pelas partículas em suspensão.

- **Curvas de Reflectância de Fitoplâncton**

A presença de fitoplâncton é capaz de produzir, através de seus pigmentos fotossintetizantes (moléculas que captam energia eletromagnética no intervalo de 400 a 700 nm) efeitos de absorção ao longo do espectro na região do visível e ao mesmo tempo contribuir para o aumento do espalhamento juntamente com as demais partículas refratoras em suspensão (KIRK, 1994). Teoricamente, a maioria desses pigmentos podem ser detectados remotamente, por absorverem fortemente a energia em certas áreas do espectro



eletromagnético e definirem assinaturas espectrais próprias. Alguns pigmentos já tiveram seus espectros determinados em laboratório e podem fornecer informações importantes sobre feições de absorção diagnósticas, porém a grande diversidade de pigmentos existentes torna as pesquisas científicas importantes na exploração do comportamento espectral dos mesmos. A Tabela 1 apresenta alguns pigmentos fotossintetizantes e suas regiões de absorção.

Tabela 1 - Locais espectrais de absorção por pigmentos

Absorção (nm)	Pigmento	Tipo de Plâncton
438	clorofila <i>a</i>	todos os tipos
470	hexa-ficoxantina	cianobactérias
480	$\beta$ caroteno	dinoflagelados, diatomáceas, crisófitas
493	ficorobilina	cianobactérias
562	c-ficoeritrina	cianobactérias
567	ficorobilina	cianobactérias
615	c-ficocianina	cianobactérias
624	cp-cianina	cianobactérias
627	ficorobilina	cianobactérias
650	aloficocianina	cianobactérias
676	clorofila <i>a</i>	

Fonte: Adaptado de Rudorff (2006); Dekker (1993); Weaver e Wrigley (1994)

A clorofila, por ser um dos principais responsáveis pela fotossíntese, destaca-se dentre os diversos pigmentos fotossinteticamente ativos, constituindo-se em um indicador da biomassa fitoplanctônica. Portanto, a concentração da clorofila é uma medida indireta da quantidade de organismos clorofilados presentes num ambiente hídrico podendo determinar o estado trófico de um determinado sistema aquático (GOODIN et al., 1993).

A Figura 4 apresenta as feições significativas na resposta espectral de uma coluna d'água, analisadas em função da concentração de clorofila, em experimentos realizados por Rundquist et al. (1996).



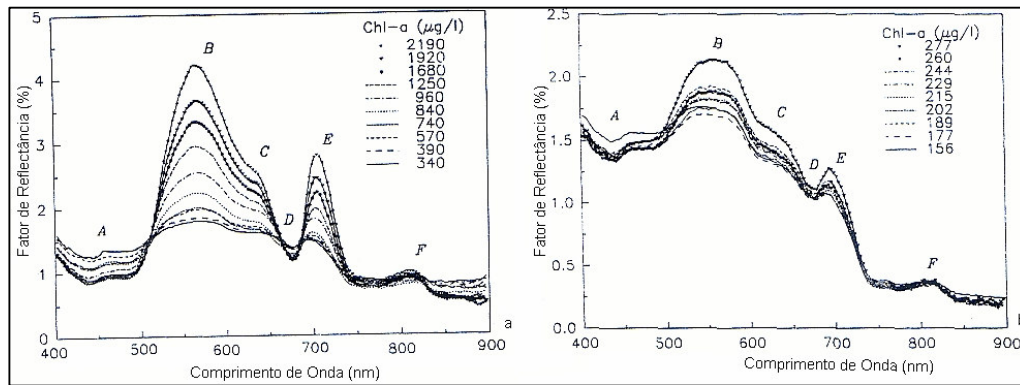


Figura 4 (a e b)- Curvas de reflectância com diferentes concentrações de clorofila

Fonte: Rundquist et al.(1996)

Observa-se na Figura 4 (a e b) que as feições espectrais associadas à presença de clorofila na coluna d'água são representadas por:

- Feição A: a baixa reflectância entre 400 e 500 nm, ocorre devido à absorção da luz azul, com um mínimo em 438 nm, sendo considerado o primeiro feição de absorção pela clorofila *a*;
- Feição B: pico de reflectância máxima no verde entre 560 e 570nm causado pela menor absorção da luz verde pelas algas (GITELSON, 1992);
- Feição C: um pequeno ponto de inflexão em torno de 640 nm, decorrente da absorção causada por pigmentos acessórios (GITELSON, 1992);
- Feição D: tradicional região de absorção no vermelho em aproximadamente 676 nm causada pela clorofila *a*;
- Feição E: pico de reflectância no infravermelho próximo entre 700 e 720 nm, que tem sido explicado por: fluorescência de pigmentos de fitoplâncton (CARDER; STEWARD, 1985); espalhamento de células algais combinado com um efeito mínimo de absorção provocado pela água e pigmentos. A elevação desse pico pode ser usada para estimar a quantidade de clorofila (JENSEN, 2002).
- Feição F: pequeno pico de reflexão que ocorre em cerca de 810 nm que é causado provavelmente pelo espalhamento da matéria orgânica (células algais), combinado com a absorção pela água limpa no infravermelho (RUNDQUIST et al., 1996).



Pode-se considerar pelas análises realizadas por Rundquist et al. (1996) que o aumento da concentração de clorofila no corpo d'água causa um aumento da reflectância espectral, nos pontos B, C e E, e diminuição da reflectância nos pontos A e D. Portanto, conforme a concentração de clorofila aumenta na coluna d'água, ocorre uma diminuição significativa da quantidade de energia refletida nas regiões espectrais do azul e do vermelho e um aumento da reflectância na região espectral do verde (JENSEN, 2000).

- **Curvas de Reflectância para concentração fixa de clorofila, variando a concentração de sedimentos em suspensão**

Na análise das curvas de reflectância para uma certa concentração fixa de clorofila  $a$  e variando a concentração de sedimentos em suspensão (de 0 a 500 mg/l), como mostra a Figura 5, observa-se que o aumento da concentração de sedimentos causa um aumento da reflectância em toda a faixa espectral, sendo que a forma da curva também é alterada, pela presença de clorofila (BARBOSA, 2005). Observa-se que para a água com concentração somente de algas (0 mg/l), o pico de reflectância encontra-se na região do visível em aproximadamente 550 nm e com a adição de sólidos esse pico se desloca em direção a 600 nm, tornando-se mais achatado e menos definido quando a concentração de sedimentos aumenta (JENSEN, 2002). Assim, o pequeno ponto de inflexão em torno de 640 nm, decorrente da absorção por clorofila, tende a desaparecer. Entretanto, as posições do pico de reflectância por algas na faixa 700-720 nm e do pico de absorção na faixa 660-670 nm, permanecem inalteradas, mudando somente as profundidades.



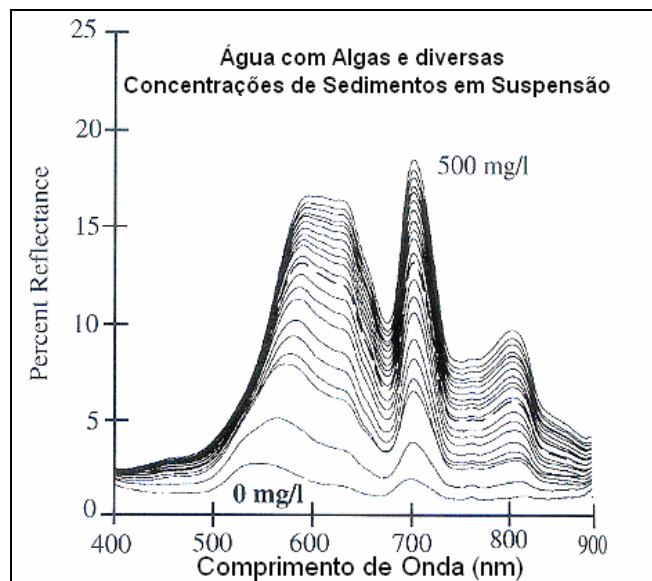


Figura 5 – Porcentagem de reflectância de água com alga e com concentrações variáveis de sedimentos em suspensão.

Fonte: Han (1997)

Na Figura 5 observa-se também um aumento gradativo no pico de reflectância no intervalo de 700 a 720 nm e na região de absorção entre 660 e 670 nm, com o aumento da concentração de sedimentos em suspensão. No entanto, Quibell (1991) mostrou que a diferença de reflectância nos comprimentos de onda em cerca de 710 nm e 665 nm ( $\rho_{710\text{nm}} - \rho_{665\text{nm}}$ ) permanece constante independente da quantidade de sedimentos adicionados. Assim, a diferença de reflectância entre essas duas bandas pode ser utilizada para estimar a concentração de clorofila em condições de turbidez variável causada pela variação na concentração de partículas inorgânicas.

Rundquist et al. (1996) estimaram acuradamente concentração de clorofila na coluna d'água usando uma razão simples "NIR/red", (705/670 nm) para baixas concentrações de clorofila e obtiveram bons resultados analisando a primeira derivada da curva de reflectância em 690 nm, para altas concentrações de clorofila.

### 3.2 Métodos de Análise de medidas espectrorradiométricas

As medidas espectrorradiométricas de reflectância tomadas "in situ" são muito importantes para as pesquisas em sensoriamento remoto, pois simulam as condições naturais de radiação para determinar o fator de reflectância do alvo de interesse (MILTON, 1987). Elas funcionam como uma ponte entre medidas ópticas de laboratórios e medidas a

nível orbital ou aerotransportado; e eliminam alguns efeitos indesejáveis como influência atmosférica e o efeito de escala.

Os equipamentos utilizados para medidas espectrais, normalmente possuem um número discreto de canais, e o dado resultante, ou seja, a reflectância, depois de processada, é disponibilizada na forma de uma matriz de N por 2, onde N é o número de canais ou bandas espectrais. Uma das colunas contém o comprimento de onda do centro da banda e a outra o valor da reflectância na banda (BARBOSA, 2005). Neste estudo o espectroradiômetro utilizado (FieldSpec UV/VNIR) trabalha na faixa de 400 – 1000 nm com uma resolução espectral média de 1 nm.

As técnicas utilizadas neste trabalho para extração de informação de espectros de reflectância obtidos “in situ” foram a remoção do contínuo e a razão e diferença de bandas, apresentadas a seguir.

### 3.2.1 Remoção do Contínuo

Uma das técnicas mais atuais empregadas para dados de sensoriamento remoto hiperespectral é a remoção do contínuo. Ela é representada por uma função matemática utilizada para isolar bandas de absorção particulares dos espectros de reflectância, permitindo qualificar feições contínuas e individuais dos espectros que retratam características intrínsecas dos alvos (CLARK et al., 2003; KRUSE et al., 1993). Sua aplicação é importante, pois permite acentuar estas feições, reduzir os efeitos externos e identificar os elementos causadores (CLARK & ROUSH, 1984).

Segundo Kruse et al. (1993), a identificação do contínuo espectral é feita a partir da ligação dos pontos de máxima reflectância do espectro. O processo de remoção do contínuo é realizado por meio de uma divisão dentro do espectro para normalizar as bandas de absorção em um referencial comum. A divisão deve ser feita quando o espectro estiver em valores de reflectância, sendo a subtração aplicada para dados de absorção aparente.

A formulação matemática para a remoção do contínuo, denominada fator de reflectância do contínuo  $\rho_{CR\lambda}$  pode ser expressa pela divisão do valor da reflectância  $\rho_{Original\lambda}$  para cada banda da feição de absorção pela linha do espectro do contínuo (superfície convexa)  $\rho_{contínuo\lambda}$ . O  $\lambda$  representa o comprimento de onda (Equação 1) (CLARK & ROUSH, 1984; MUTANGA & SKIDMORE, 2003; CLARK et al., 2003).



$$\rho_{CR\lambda} = \frac{\rho_{Original\lambda}}{\rho_{contínuo\lambda}}, \quad (1)$$

Vale ressaltar que o espectro do contínuo ( $\rho_{contínuo\lambda}$ ) pode ser formulado matematicamente pela equação da reta, definida na equação (2), em que  $\lambda$  representa o comprimento de onda para cada banda que define a feição de absorção. O coeficiente angular ( $k$ ) é definido pela Equação (3) e o coeficiente linear ( $w$ ) é obtido pela equação (4), ajustadas aos limites superiores e inferiores de cada feição de absorção, definidos pelo analista (BREUNIG, 2007).

$$y = k\lambda + w \quad (2)$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (3)$$

$$w = \frac{[\rho_1 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)] + [-\lambda_1 \cdot (\rho_2 - \rho_1)]}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (4)$$

no qual tem-se,  $\rho_2$  representando a reflectância espectral observada no limite superior da feição de absorção;  $\rho_1$  a reflectância espectral observada no limite inferior da feição de absorção;  $\lambda_2$  representa o comprimento de onda do limite superior da feição de absorção; e  $\lambda_1$  o comprimento de onda do limite inferior da feição de absorção.

A Figura 6 apresenta um exemplo de uma banda de absorção resultante da aplicação da técnica de remoção do contínuo. Vários parâmetros estão associados a esta banda como: profundidade, posição, largura e assimetria. Estes parâmetros servem como indicadores quantitativos das propriedades espectrais das amostras analisadas. Isto pode ser feito, por exemplo, comparando as curvas de reflectância normalizada de cada amostra com curvas espectrais de referência, obtidas a partir de amostras cujas propriedades sejam conhecidas.

Esta técnica pode servir também para desenvolver modelos que relacionem diretamente os parâmetros da banda de absorção com as variáveis limnológicas das amostras.



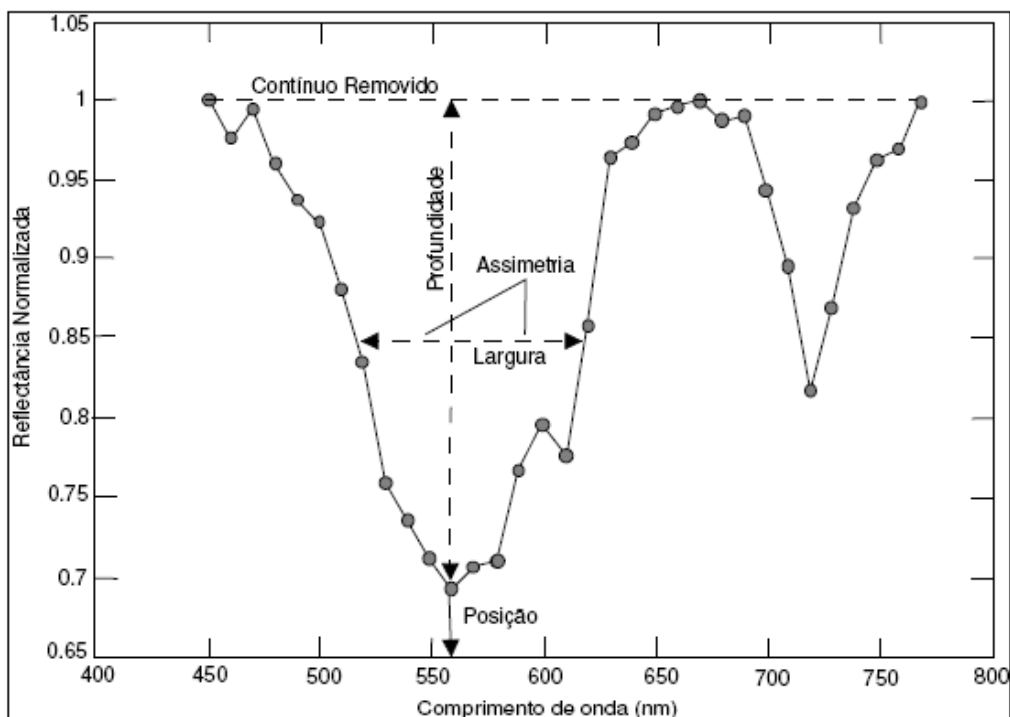


Figura 6 - Definição de parâmetros de uma banda de absorção normalizada pela técnica de remoção do contínuo, medidas (posição, profundidade, largura e assimetria)

Fonte: Adaptado de Schowengerdt (2006)

A profundidade da banda (BD), apresentada na Figura 10, é obtida para cada banda da feição de absorção, utilizando-se a equação (11) (KOKALY & CLARK, 1999; MUTANGA & SKIDMORE, 2003). A profundidade da banda de absorção, apresentada por Clark e Roush (1984), está associada à quantidade de energia absorvida:

$$BD = (1 - \rho_{CR\lambda}) \quad (5)$$

onde  $\rho_{CR\lambda}$  é o fator de reflectância do contínuo para o comprimento de onda  $\lambda$ .

As áreas das feições de absorção podem ser calculadas através da aproximação numérica que considera a área do trapézio entre cada  $\lambda$  discretizado pelo sensor em relação à profundidade da banda (BD), para os limites escolhidos das bandas de absorção:

$$A_b = \sum_{i=m}^M \frac{(BD_i + BD_{i-1})}{2} \cdot (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \quad (6)$$

em que,  $A_b$  é a área da feição de absorção; e  $i$  representa o intervalo de cálculo que vai de  $m$ , limite inferior da feição de absorção a  $M$ , limite superior.

Para o cálculo de alguns parâmetros, é necessário definir a posição de um  $\lambda$  de referência, representativo das bandas de absorção que irá formar a feição de absorção. Uma das maneiras consiste em localizar o  $\lambda$  em que ocorreu a maior profundidade. A outra maneira é fixar um  $\lambda$ , com base em estudos preliminares (BREUNIG et al., 2007).

Pu et al. (2003) definem o  $\lambda$  de referência na profundidade máxima da feição de absorção. Assim, o valor da largura da feição de absorção foi obtido na metade da profundidade máxima da feição como representa a Figura 6.

A assimetria é definida pela razão da soma dos valores de reflectância para as bandas da feição de absorção à direita do  $\lambda$  de referência, e pela soma dos valores de reflectância para as bandas de feição de absorção à esquerda do  $\lambda$  de referência. Assim, feições de absorção simétricas possuem assimetria com valor zero (a área da esquerda e da direita do  $\lambda$  de referência são iguais). Bandas de absorção que são assimétricas em direção a menores comprimentos de onda têm assimetria negativa, enquanto bandas que têm assimetria em direção a altos valores de comprimentos de onda têm assimetria positiva. A magnitude desse valor indica o grau de assimetria (Figura 7) (KRUSE et al., 1993).

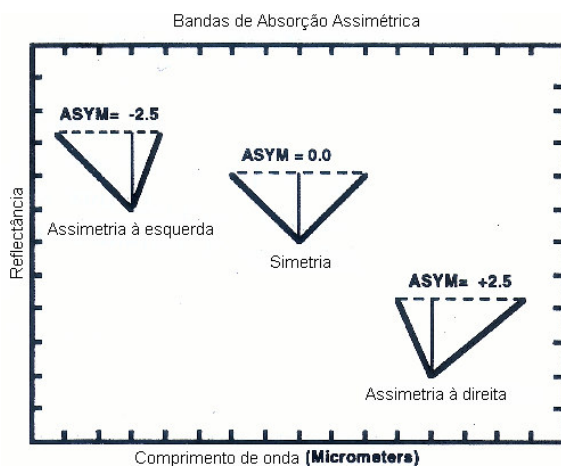


Figura 7 – Esquema apresentando bandas de absorção assimétricas

Fonte: Kruse et al. (1993)

Uma das primeiras aplicações da técnica da remoção do contínuo para estudar a qualidade da água foi feita por Nobrega (2002). Breunig et al. (2007b) avaliaram a separabilidade de classes de água, a partir da remoção do contínuo em um corpo d'água, com dados hiperespectrais medidos em campo.

### 3.2.2 Razão e Diferença Espectral

A razão e diferença entre imagens constituem-se de realces resultantes, respectivamente, da divisão e subtração de valores de reflectância, de uma banda espectral pelos valores correspondentes em outra banda, pixel a pixel. Para as curvas espectrais obtidas “in situ” com espectro-radiômetro, a razão e diferença de bandas são realizadas a partir dos valores de reflectância para cada curva espectral.

O método é frequentemente usado para discriminação das variações espectrais súbitas na cena, que são mascaradas pelas variações de brilho em uma banda espectral individual (ou fator de reflectância), ou nas composições coloridas padrão (DEKKER, 1993). A maior vantagem das técnicas é que preservam as características espectrais das feições da imagem, desconsiderando as variações decorrentes de condições de iluminação da cena. Porém, é necessário remover os ruídos e corrigir a imagem dos efeitos atmosféricos, que por serem efeitos aditivos, podem ser realçados quando da aplicação da técnica. (MUSTARD & SUNSHINE, 1999).

Por ser muito simples, o método é usado em ambientes aquáticos para estimar concentração clorofila, sólidos em suspensão e matéria orgânica dissolvida, por análises estatísticas diretas com dados limnológicos coletados em campo, formando modelos que quantificam esses componentes (HOGE et al., 1987). Contudo, para que sua aplicação forneça resultados aceitáveis, em relação a componente opticamente ativa analisada, é necessário selecionar regiões espectrais que forneçam informações apenas da componente em análise (DEKKER, 1993).

Diversos autores propuseram regiões de aplicação de razão de bandas para detectar os principais constituintes opticamente ativos em corpos d'água. Dentre eles pode-se destacar Cipollini e Corsini (1994) que utilizaram razão nas regiões espectrais do azul e verde para detectar presença de matéria orgânica dissolvida; Doxoran et al. (2004) observaram altas correlações entre a razão  $\rho_{850}/\rho_{550}$  com total de sólidos suspensos e entre a razão  $\rho_{400}/\rho_{600}$  com matéria orgânica dissolvida; Gitelson (1992); Gitelson & Kondratyev (1991); Mittenzewey et al. (1992); Rundquist et al. (1996), Ruddick (2001); Yacobi et al. (1995); Hoge et al. (1987) que estimaram a clorofila *a* a partir da razão espectral entre as feições de absorção e reflectância nas regiões do vermelho (“red”) e infravermelho próximo (“NIR”).



Especificamente para a clorofila *a*, é bastante citado na literatura a razão entre a banda de absorção na região do vermelho (em aproximadamente 670 nm) e a banda de fluorescência na região do infravermelho próximo, usualmente denominada “NIR”, em aproximadamente 700 nm, conhecida como “NIR/red”. As razões espectrais azul/verde também são muito utilizadas para estimar clorofila. Para a banda azul, a região em aproximadamente 440 nm, caracterizada pelo pico de absorção máximo pela clorofila *a*, é escolhida. A região entre aproximadamente 550 e 555 nm, caracterizada pela absorção mínima pelo fitoplâncton, é escolhida (CANNIZZARO & CARDER, 2006 apud LONDE, 2008).

Para Ruddick et al. (2001) essa feição de absorção da clorofila *a* na região do vermelho ( $\approx 670$  nm) é atrativa para a formulação de razões espectrais, pelo fato dessa região minimizar interferências de absorção do tripton e da matéria orgânica dissolvida, principalmente em ambientes aquáticos com alto grau de turbidez.

Resultados significativos também foram obtidos para razão entre o pico de reflectância máxima do verde ( $\pm 560$ nm) pelo pico de reflectância máxima na região do infravermelho ( $\pm 700$ nm) ( $\rho_{700}/\rho_{560}$ ) na estimativa de concentração de clorofila (GITELSON, 1992; GITELSON & KONDRATYEV, 1991).

Kirk (2004) e Hoge et al. (1987) relatam que métodos empíricos têm sido desenvolvidos para estimar concentração de clorofila *a*, utilizando calculo de razões ou diferença entre a região do azul (400 a 551 nm) e verde (515 a 600 nm). Isto, pelo fato desses intervalos apresentarem consideráveis mudanças de reflectância com a variação de concentração de clorofila *a* na água. Segundo os autores, a utilização da razão espectral nesses intervalos tem gerado resultados bastante robustos para a estimativa de concentração de componentes opticamente ativos na água, porém é necessário ter uma concentração mínima da componente em análise no ambiente aquático para que a estimativa seja acurada.

### **3.3 Tratamento e Análise de Imagens Multiespectrais**

As imagens orbitais de satélites artificiais possuem as características de visão panorâmica e periodicidade, que são muito importantes para o monitoramento do meio ambiente. Atualmente a resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal dos produtos de sensoriamento remoto disponíveis no mercado encontram-se bastante diversificadas.



Com o advento dos satélites artificiais de alta resolução, o grau de detalhamento das imagens orbitais aumentou consideravelmente, permitindo o seu uso em diversas áreas de aplicação, como agricultura, recursos naturais, telecomunicações, mapeamento, planejamento urbano, entre outros.

O Ikonos II é um desses satélites, e possui como características principais a alta resolução espacial de 1 metro para banda pancromática e 4 metros para as bandas multiespectrais. A capacidade de visada off - nadir também é uma característica importante, uma vez que permite a melhora do período de revisita sobre a mesma área, de dois a três dias, permitindo também a geração de pares estereoscópicos.

As características técnicas da imagem Ikonos II são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características técnicas da imagem e do satélite Ikonos II

Altitude	680 Km
Inclinação	98,1°
Velocidade	7 Km/s
Sentido da órbita	Descendente
Duração da órbita	98 min
Tipo de órbita	Sol-síncrona
Ângulo de visada	Rápida alternância entre diferentes ângulos
Resolução no terreno de cada banda	Pancromática: 1m (considerando posição nominal de 26° fora do nadir) Multiespectral: 4m (considerando posição nominal de 26° fora do nadir)
Bandas Espectrais	Pan: 0,45 a 0,90 $\mu\text{m}$ Azul: 0,45 a 0,52 $\mu\text{m}$ Verde: 0,52 a 0,60 $\mu\text{m}$ Vermelho: 0,63 a 0,69 $\mu\text{m}$ Infra-vermelho próximo: 0,76 a 0,90 $\mu\text{m}$
Tamanho das cenas sugeridos	Faixa de 11Km x 11 Km até 11 Km x 1000Km Mosaicos de até 12000 Km <sup>2</sup> Até 20000 Km <sup>2</sup> de área contínua imageada em uma única passagem
Acurácia métrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Correção de sistema sem pontos de controle cartográficos (tipo Map) Horizontal: 12m Vertical: 10m Precisão relativa de pelo menos 90% de cena</li> <li>• Correção de sistema com pontos de controle cartográficos (tipo Precision Plus) Horizontal: 2m Vertical: 3m Precisão relativa em pelo menos 90% da cena</li> </ul>
Tempo de revisita	Pan: 2,9 dias Multiespectral: 1,5 dia Esses valores referem-se a alvos ao longo da latitude de 40°. O tempo de revisita para latitudes maiores será menor, enquanto que para latitudes próximas ao Equador, o tempo será mais longo.

Fonte: Geoeye (2008)

Há também a possibilidade de combinação de imagens preto e branco com dados multiespectrais para a geração de imagens coloridas com 1m de resolução. A



radiometria é de 11 bits (2048 níveis de cinza), o que aumenta o poder de contraste e de discriminação das imagens.

### 3.3.1 Pré-processamentos (Correção Radiométrica e Atmosférica)

A identificação e discriminação de alvos através do sensoriamento remoto depende da radiação recebida pelo sensor. Considerando que entre o sensor e a superfície existe a atmosfera, responsável por alterações no fluxo radiante proveniente do alvo, como perda de nitidez na imagem e deformação do brilho superficial, é necessário corrigir os fatores que causam essas alterações nas imagens orbitais.

Os principais fatores causadores de tais alterações são o espalhamento e a absorção pelos gases atmosféricos. Em geral, nos comprimentos de onda menores (visível), o principal efeito atmosférico é o espalhamento, enquanto que nos comprimentos de onda maiores (infravermelho próximo e médio), o espalhamento pode ser desprezível, sendo a absorção o principal efeito atmosférico (LATORRE, 1998).

Segundo Zullo Jr. et al. (1996), a relação entre os valores digitais das imagens de satélite e a radiância ou a reflectância das superfícies observadas é afetada pelas perturbações próprias do sensor, incluindo a resolução radiométrica e dinâmica dos dados, pelos efeitos devido a presença da atmosfera e, também, pelo perfil do relevo terrestre.

Os modelos para correção dos efeitos atmosféricos, geralmente incorporam o tratamento dos efeitos causados pelo espalhamento Rayleigh (molecular) e pelo espalhamento Mie (aerossóis). O espalhamento molecular é tipicamente responsável pelas maiores contribuições. Com relação ao espalhamento pelos aerossóis é necessário considerar-se a distribuição vertical desses aerossóis, sua distribuição efetiva de tamanho e suas propriedades ópticas (KAMBEL & NOVO, 2005).

Devido a esses tipos de interferências da atmosfera na radiação recebida por sensores remotos orbitais, sistemas multiespectrais procuram minimizar os efeitos atmosféricos através do aproveitamento das chamadas janelas atmosféricas, nas quais a radiação proveniente do alvo registrada pelo sensor, apresenta altos valores de transmitância, ou seja, embora ainda presente, a influência da atmosfera é menor (RICHARDS & JIA, 2006).

Existem diversos programas computacionais desenvolvidos especificamente para a remoção dos efeitos atmosféricos nas imagens de satélite. Dentre eles podemos citar o



sistema SCORADIS (*Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélites*), desenvolvido por Zullo Jr. (1994) no Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura da Universidade Estadual de Campinas (CEPAGRI/UNICAMP), que utiliza o modelo de transferência radiativa 5S (*Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire*) de correção atmosférica, desenvolvido pelo *Laboratoire d'Optique Atmosphérique* (LOA) da Universidade de Lille (França). Este aplicativo foi elaborado a partir de trabalhos experimentais realizados nas condições de atmosfera brasileira, clima e disponibilidade de dados; o aplicativo ACORN (*Atmospheric Correction Now*), que tem como base o modelo de transferência radiativa MOSTRAN4, que converte os dados de radiância para valores de reflectância de superfície, corrigindo dos efeitos de espalhamento e absorção atmosférica; e o FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), que também usa como base o modelo de transferência radiativa MODTRAN4, possui uma ferramenta de correção de “efeitos adjacentes” e fornece uma opção para calcular uma visibilidade média para a cena (quantidade de aerossol e névoa atmosférica), além de utilizar uma técnica para manipulação de condições atmosféricas ruins (tais como presença de nuvens). Porém, esses programas foram desenvolvidos para aplicação em imagens hiperespectrais (Flaash e Acorn) e imagens multiespectrais dos satélites Landsat e CBERS (Scoradis), não sendo aplicáveis às imagens multiespectrais de alta resolução do Ikonos.

O método DOS (*Dark Object Subtraction*), ou subtração do objeto escuro, desenvolvido por Chavez (1989) é considerado um dos mais simples na transformação dos números digitais (ND) em valores de reflectância em imagens multiespectrais, pois a interferência atmosférica é estimada diretamente a partir da imagem. Métodos mais sofisticados, como o 5S e o 6S, requerem dados da espessura ótica no local e dia da obtenção da imagem, que muitas vezes podem ser desconhecidos (GÜRTLER et al., 2005), além de não possibilitarem a aplicação em imagens multiespectrais Ikonos.

A correção pelo método DOS é realizada a partir da estimativa da interferência atmosférica em cada banda espectral, sendo realizados em seguida os cálculos para transformação do número digital em valores de radiância e, por fim, para valores de reflectância. Os parâmetros necessários para esses cálculos variam para cada banda e são: radiância mínima e máxima, irradiância no topo da atmosfera e ganho do sensor. Além desses, outros parâmetros que dependem da data da imagem são necessários, como a distância Terra-Sol e o ângulo de elevação solar (CHAVEZ, 1996; GÜRTLER et al., 2005).



No método DOS, proposto por Chavez (1989), o cálculo da interferência atmosférica utiliza o histograma de frequência de números digitais de uma das bandas da imagem, de preferência a banda 1, para encontrar o nível digital mais baixo em que há resposta espectral de alvos. O princípio do método é de que na imagem existem alvos escuros, em geral sombras de nuvens ou geradas pela topografia, que deveriam apresentar um número digital muito baixo na imagem, equivalendo a 1% de reflectância. Porém, o valor do pixel mais escuro encontrado na imagem é geralmente muito superior a esse valor, pois ocorrem ruídos do próprio sensor, que mesmo quando não está recebendo radiação retorna um sinal como resposta, além do espalhamento atmosférico, que exerce interferência nos comprimentos de onda mais curtos. As correções dos ruídos são feitas a partir dos parâmetros de engenharia do satélite, geralmente fornecidos e atualizados pelos fabricantes. Os efeitos atmosféricos podem ser corrigidos, dentre outros, pelo método DOS (GÜRTLER et al., 2005).

#### 4 ESTUDO DE CASO

Para o desenvolvimento do método proposto, ou seja, a representação da distribuição espacial de variáveis limnológicas que indicam a qualidade da água e estejam associadas à sua característica espectral, e avaliar sua correlação com dados espectrais tomados “in situ” e extraídos de imagens orbitais de satélites de alta resolução espacial, selecionou-se como área de estudo o reservatório de Itupararanga-SP, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Sorocaba – Médio Tietê.

O reservatório de Itupararanga foi o escolhido, por ser um dos maiores mananciais de água potável da região de Sorocaba, abastecendo os municípios de Sorocaba, Votorantim, Mairinque, Alumínio, Ibiúna e São Roque, num total de aproximadamente 800.000 habitantes, sendo portanto considerado de boa qualidade de água. Além disso, trata-se de uma das áreas de estudos dos pesquisadores da Faculdade de Ciências Agrárias – FCA, da Unesp-Botucatu, e para o qual dispunha-se de apoio logístico para o levantamento de dados “in situ”.

O principal curso d’água que forma o reservatório de Itupararanga é o rio Sorocaba, o qual localiza-se no Estado de São Paulo, na denominada UGRHI 10 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos) – Sorocaba/Médio Tietê. O reservatório possui,



principalmente em sua margem direita, grande porção contínua de área natural, constituindo importante remanescente vegetal e de refúgio para fauna. Essa condição é considerada de grande relevância regional, de modo que o governo do Estado definiu como Área de Proteção Ambiental (APA) as áreas do entorno do reservatório de Itupararanga e da bacia do rio Sorocaba, através da Lei Estadual n° 10.100/98.

A Figura 8 apresenta a localização do reservatório de Itupararanga no Estado de São Paulo. As coordenadas no sistema de projeção UTM, fuso 23 e Datum WGS84, referentes à parte central do reservatório são E (m): 264090,185 e N (m): 7385377,742.

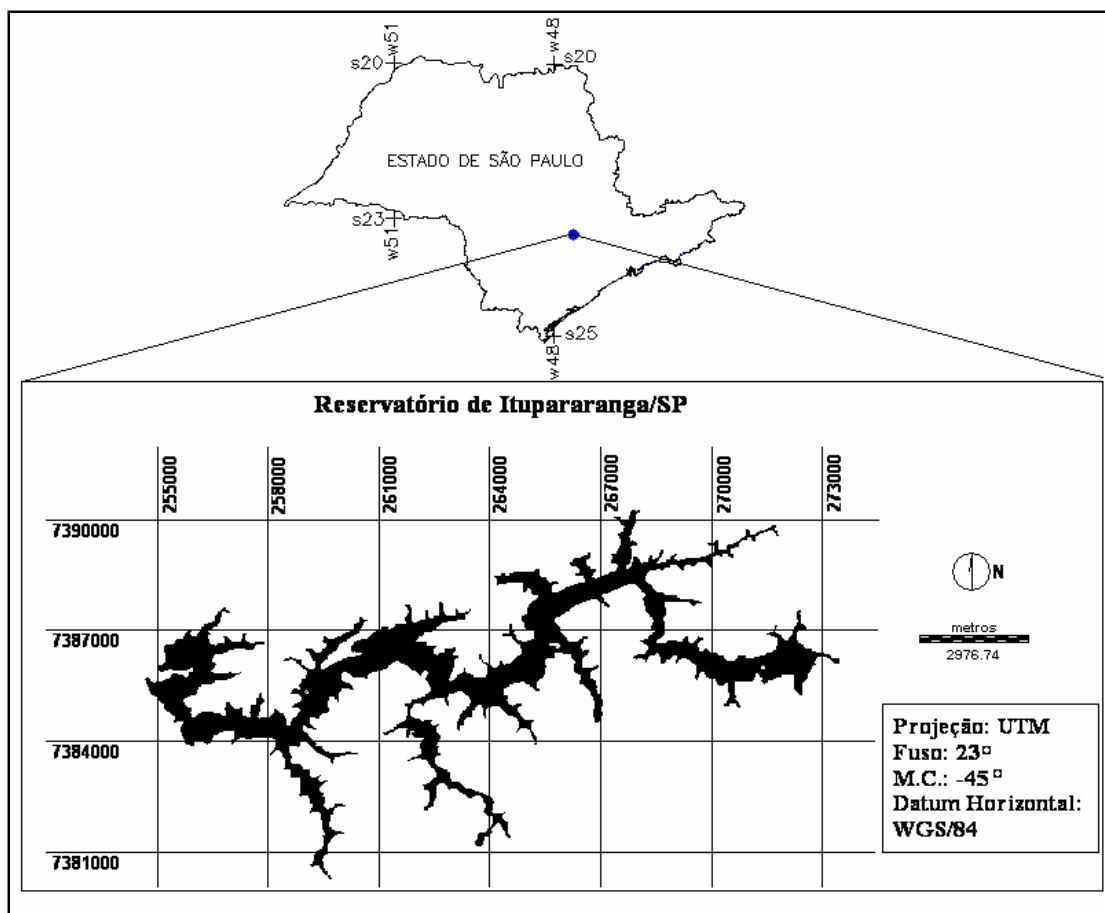


Figura 8 - Localização da área de estudo no estado de São Paulo

O reservatório de Itupararanga foi construído em 1912, pela Companhia de Energia Elétrica - Light para geração de energia elétrica, e hoje atende a 63% da demanda de água para abastecimento público na bacia do rio Sorocaba (SÃO PAULO, 1998). Nos trabalhos de campo realizados na região, observou-se que o entorno da represa é um meio prioritariamente rural, com intenso uso agrícola, basicamente de pequenos proprietários que

cultivam produtos hortifrutigranjeiros, que na maioria dos casos localizam-se “morro abaixo”, os quais são irrigados pelas águas da represa. Segundo São Paulo (1998) a sub-bacia do Alto Sorocaba, na qual o reservatório se insere, possui 13.438,8 hectares ocupados com áreas agrícolas, nas quais destaca-se a cultura de olerícolas (grande número de espécies de plantas, comumente denominadas hortaliças, que engloba culturas folhosas, raízes, bulbos, tubérculos e frutos diversos), batatas e tomate envarado. Nessas culturas ocorre a utilização de agrotóxicos, como por exemplo o inseticida Metamidophos, utilizado nas culturas de batata e tomate e que apresenta como princípio ativo organofosforados; outro exemplo é a aplicação de Oxicloreto de cobre nas culturas de Olerícolas. Essas substâncias, uma vez aplicadas nas culturas, são transportadas até os cursos d’água por escoamento superficial (que ocorre devido a eventos de precipitação ou devido à irrigação artificial dessas culturas), podendo causar prejuízos aos ecossistemas locais e até a saúde humana. Outros impactos ocorrem devido ao contínuo parcelamento do solo e criação de chácaras de recreio nas margens do reservatório, o que é favorecido pela proximidade em relação à Região Metropolitana de São Paulo. Também se tem a poluição ocasionada pelo lançamento diário de esgotos nas cabeceiras do rio Sorocaba que, de acordo com São Paulo (1998), são estimadas em cerca de 1.688 kg DBO<sub>5,20</sub> (parâmetro relacionado à carga orgânica presente).

A geologia identificada na área em que se insere o reservatório de Itupararanga é caracterizada pelo predomínio do grupo sedimentar Tubarão, o qual é composto por dois subgrupos: o Itararé (caracterizado predominantemente por arenitos finos a grosseiros, lamitos e diamictitos nas partes superior e inferior; e por arenitos finos, siltitos e lamitos na parte intermediária) e a formação Tatuí (composta basicamente de arenitos e siltitos muito finos). A vegetação natural original constitui-se predominantemente pelas Florestas Estacionais Semidecíduais (formações vegetais sujeitas a avançado grau de queda das folhas durante a seca e com características semelhantes às Florestas Ombrófilas, onde não há falta de água durante o ano, sendo constituídas por árvores de médio e grande porte), verificando-se também a presença de fragmentos de cerrado e de Florestas Ombrófilas.

As atividades agrícolas, em associação ao contínuo parcelamento do solo e criação de chácaras de recreio, ocasionam a degradação da vegetação natural remanescente na área e a degradação dos cursos d’água existentes e do reservatório, como pode ser observado na Figura 9, que apresenta o mapa de cobertura do solo no entorno do reservatório, delimitado pelas áreas que drenam em direção ao reservatório, segundo estudos de Queiroz (2006).



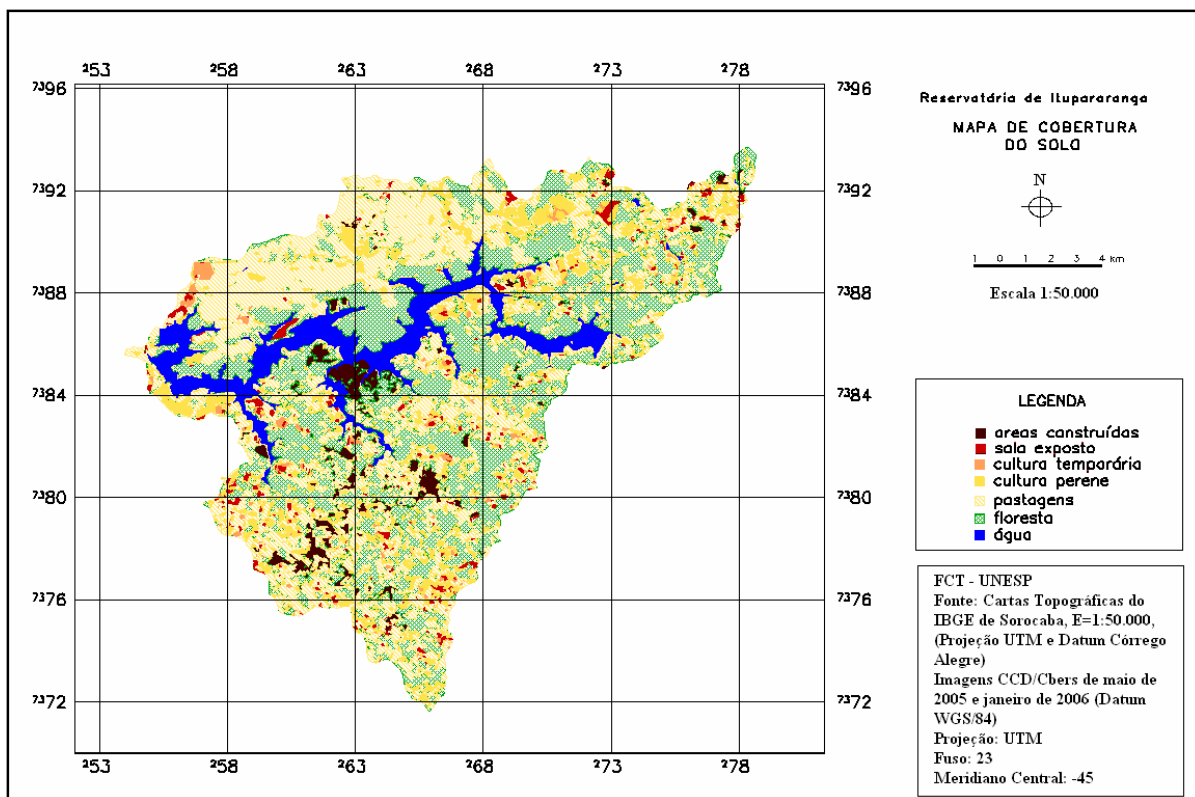


Figura 9 - Mapa de cobertura do solo do entorno do Reservatório de Itupararanga  
Fonte: Adaptado de Queiroz (2006)

Na Figura 9, Queiroz (2006) mapeou os tipos de cobertura do solo que influenciam a qualidade da água do reservatório de Itupararanga, a partir de um sistema hierárquico de classificação. Nela observa-se que a cobertura do solo predominante é de floresta, com 12744,88 ha ou 49,87% da área total analisada, sendo que as pastagens ocupam a segunda maior área, com 5616,28 ha (21,98%), seguida de culturas perenes, com 2508,20 ha (9,81%). Os corpos d'água (reservatório mais afluentes) ocupam um total de 2477 ha, ou 9,69% da área total, as áreas construídas foram identificadas em 1267,48 ha (4,96%), as culturas temporárias em 557,80 ha (2,18%) e o solo exposto em 383,96 ha (1,5%). Verifica-se que um dos principais problemas ambientais decorrentes da alteração da cobertura do solo é o avanço das áreas agrícolas, pastagens e áreas construídas sobre a área de vegetação natural, incluindo aquelas próximas aos cursos d'água, cuja função ecológica é fundamental para a qualidade da água dos afluentes e do próprio reservatório.

## 5 MATERIAL E MÉTODO

Este capítulo apresenta os materiais, equipamentos e programas computacionais utilizados no desenvolvimento da pesquisa, bem como o método adotado para atingir o objetivo proposto, que é estimar a distribuição espacial de variáveis limnológicas com base nas suas propriedades ópticas, para um reservatório de uso múltiplo.

### 5.1 Material e Equipamentos

O material utilizado para a realização deste trabalho de pesquisa corresponde a imagens orbitais de média resolução espacial dos satélites Landsat/TM e ETM+, tomadas entre maio de 1985 e maio de 2003, respectivamente e CBERS/CCD, datadas de fevereiro de 2005 e janeiro de 2006. Além de imagens multiespectrais de alta resolução espacial do satélite Ikonos II, adquiridas em abril de 2001, fevereiro de 2007 e março de 2007.

Para o posicionamento dos pontos de coleta “in situ” foram utilizados os receptores de precisão de simples frequência 4600 e de dupla frequência Hyper, além do receptor de navegação Garmin 12XL.

Na coleta de dados espectrais em campo foi utilizado o espectrorradiômetro *FieldSpec UV/VNIR (Analytical Spectral Devices, Inc.)* de propriedade do Inpe – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e disponibilizado para uso nesta pesquisa.

#### 5.1.1 Aplicativos Computacionais

Os aplicativos computacionais utilizados na pesquisa foram:

- IDRISI Andes - é um Sistema de Informações Geográficas e de processamento de imagens desenvolvido pelo “Graduate School of Geography” da “Clark University”, projetado para a análise de dados geográficos em formato matricial. Consiste de um programa principal de interface e mais de 150 módulos de programas que fornecem facilidades na entrada, na visualização e na análise de dados geográficos. O IDRISI também possui um módulo de conversão vetor-matriz, pois ele trabalha



somente com imagens e operações *booleanas* que permitem o cruzamento entre planos de informações. Trabalha de forma analítica matriz (imagem), cobrindo um amplo espectro de necessidades de SIG e de Sensoriamento Remoto, desde consulta a banco de dados e modelagem espacial, até realce e classificação de imagens (EASTMAN, 1998). Além das tradicionais imagens multiespectrais, esse aplicativo também fornece ferramentas para o tratamento de imagens hiperespectrais;

- ENVI 4.4 (ENvironment for Visualizing Imagens) - é um sistema de processamento de imagens que permite interações gráficas entre as funções e os dados com grande facilidade. Este sistema está sendo comercializado de duas formas: com e sem a linguagem de programação IDL “Interactive Data Language”, que é a base do ENVI para rodar procedimentos complexos em modo batch (não-interativo) e agregar novas funcionalidades. Foi desenvolvido pela “RSI Mission Statement”. Possui várias ferramentas para análise e extração de dados de Sensoriamento Remoto, trabalhando com análise espectral, imagens georreferenciadas, imagens de radar e superfícies 3D. Possui suporte para imagens de várias fontes e ferramenta GIS para dados raster e vector. O ENVI não possui limitações quanto ao número de bandas, portanto é possível processar conjuntos de dados multiespectrais ou hiperespectrais. O sistema também inclui rotinas de novas programações e melhorias para ferramentas de programação existentes;
- SPRING - Sistema de PRocessamento de INformações Georeferenciadas, é um sistema para geoprocessamento em Windows e Linux, que inclui um banco de dados geográfico. Foi desenvolvido pelo INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e permite adquirir, armazenar, combinar, analisar e recuperar informações codificadas espacial e não-espacialmente. É um sistema que combina funções de processamento de imagens, análise espacial e modelagem numérica de terreno, em um único ambiente interativo. É capaz de tratar dados nos formatos vetorial e matricial. Suas funções incluem a combinação



daquelas usualmente disponíveis em sistemas de informações geográficas, programas para processamento de imagens e para modelagem digital de terreno. Como *software* para manipulação de dados geocodificados, foi estruturado em três módulos: *IMPIMA*, que permite a leitura de imagens em diversos formatos e onde é feita a conversão para o formato de imagem próprio do SPRING (GRIB); *SPRING*, onde estão disponíveis as funções relacionadas à criação, manipulação de consulta ao Banco de Dados, função de entrada de dados, processamento digital de imagens, modelagem numérica de terreno e análise geográfica de dados. É o módulo principal de entrada, manipulação e transformação de dados geográficos; e o módulo *SCARTA* que apresenta funções para que um resultado gerado no módulo principal SPRING possa ser apresentado na forma final de um documento cartográfico, sendo possível a edição de cartas e a geração de arquivos para impressão.

- MATLAB - programa utilizado para a rodar as rotinas de suavização das curvas espectrais;
- MINITAB - programa utilizado para os tratamentos e testes estatísticos (correlação e regressão linear clássica);
- EXCEL – utilizado no cálculo das Técnicas de Processamento dos dados espectrais, como Primeira derivada e Remoção do Contínuo, além das correlações estatísticas e na elaboração de gráficos e tabelas dos pontos GPS;
- GPSurvey 2.35 e TGO – utilizados no processamento dos pontos coletados com receptores GPS de precisão de simples frequência 4600 e de dupla frequência Hyper



## 5.2 Método

O método adotado para o desenvolvimento da pesquisa é apresentado no fluxograma de atividades da Figura 10.



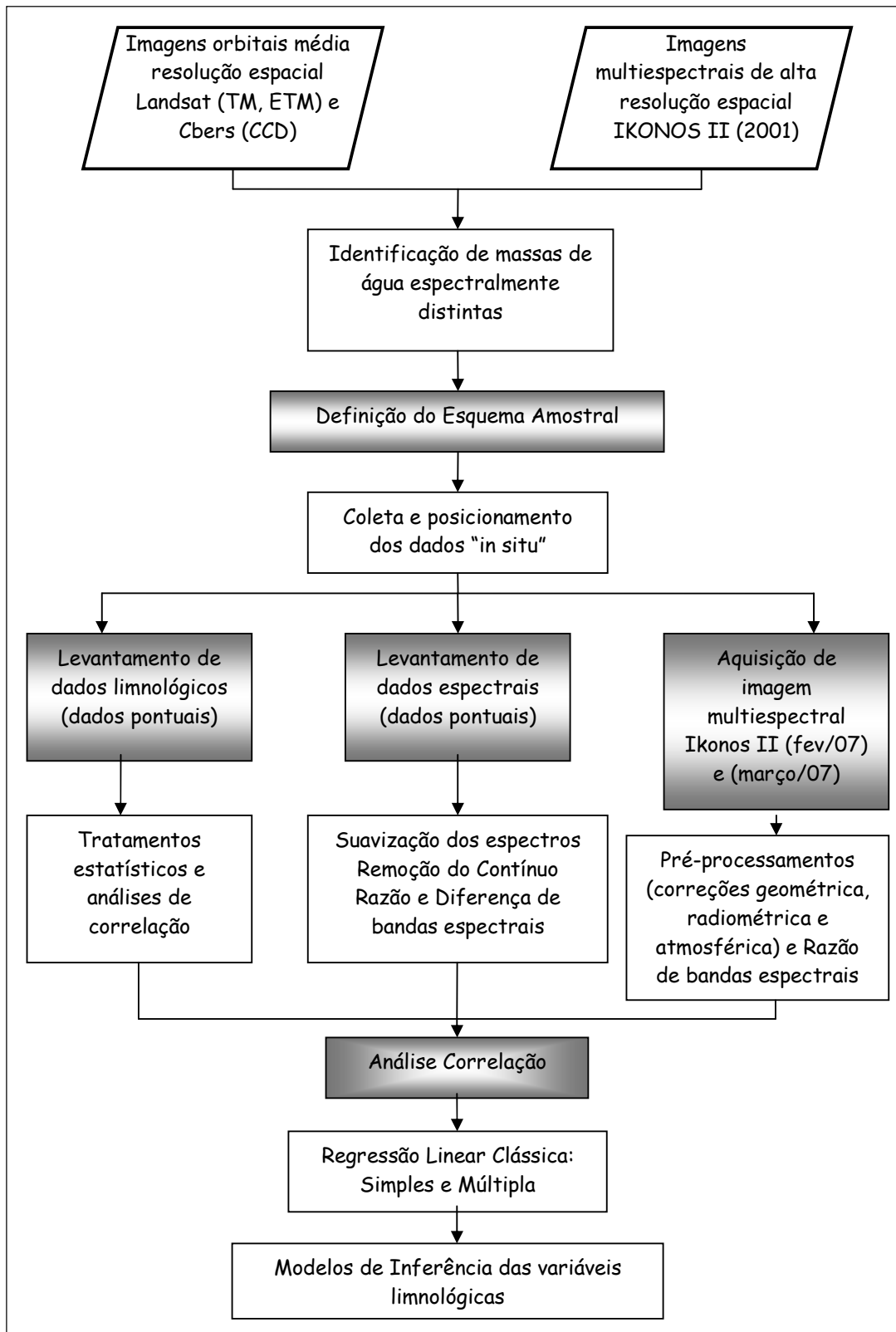


Figura 10 - Fluxograma das atividades

A definição do delineamento amostral baseou-se em uma análise temporal das imagens multiespectrais disponíveis para a área de estudo, para caracterizar o comportamento espectral da água dessa represa, considerando dois períodos representativos de sua dinâmica: seca e cheia, baseado em Barbosa (2005).

As imagens multiespectrais que representaram o período de seca foram: TM e ETM+/Landsat datadas de maio de 1985 e maio de 2003, e o período de cheia: CCD/CBERS, datadas de fevereiro de 2005 e janeiro de 2006. A imagem Ikonos II tomada em abril de 2001 foi usada no georreferenciamento das imagens de média resolução espacial.

Definido o esquema de distribuição dos elementos amostrais sobre o reservatório, partiu-se para as medições e coleta dos pontos em campo, realizada após um planejamento minucioso para a escolha da data, devido à necessidade de programação da aquisição da imagem Ikonos II, quase simultaneamente à coleta de dados “in situ”. Dados limnológicos, aqui representados por TSS – Total de Sólidos em Suspensão, Turbidez, Condutividade Elétrica e Profundidade de Secchi e os espectros obtidos através de medidas com espectro-radiômetro foram obtidos no reservatório de Itupararanga/SP nos pontos definidos no delineamento amostral e devidamente posicionados com receptores GPS de precisão e de navegação.

Tratamentos e análises exploratórios foram realizados sobre os dados limnológicos e espectrais, observando-se sua consistência. Alguns problemas foram encontrados nessa etapa do trabalho, como a baixa concentração das variáveis limnológicas no corpo d’água, principalmente TSS e a grande influência de ruídos e o baixo valor do albedo em algumas curvas espectrais, devido às condições climáticas heterogêneas nos dias da tomada dos dados em campo, com ocorrência de nuvens, ventos fortes e chuva, o que dificultou a análise dos dados. Para tentar minimizar o efeito dos ruídos foram aplicados filtros de suavização nas curvas espectrais. A Remoção do Contínuo Espectral, técnica de análise de dados espectrais que se baseia em métodos de espectroscopia, foi aplicada aos espectros, além da Razão e Diferença de Bandas Espectrais. A presença de fitoplâncton nas águas do reservatório (clorofila *a*) foi detectada nesta etapa do trabalho de pesquisa, a partir das análises das curvas espectrais obtidas em campo, aparentemente em concentrações mais significativas do que sólidos em suspensão, o que não era esperado. Como essa variável não foi disponibilizada para a pesquisa, devido ao alto custo de coleta, armazenamento e análise laboratorial, foram utilizados os métodos de análise espectral anteriormente citados (Remoção



do contínuo e Razão e diferença de bandas), que segundo a bibliografia (CHEN et al, 1992; GOODIN et al, 1993; BARBOSA, 2005; RUDORFF, 2006) melhoram a análise da resposta espectral das amostras, para avaliar a correlação existente entre as variáveis opticamente ativas no corpo d'água (TSS e Turbidez), além das variáveis Condutividade Elétrica e Profundidade de Secchi. Verificada a correlação, análises de regressão foram aplicadas entre as variáveis envolvidas.

A proposta da pesquisa baseou-se na utilização de imagem multiespectral passível de programação para a tomada dos dados, e que fornecesse uma melhor resolução espacial e radiométrica, uma vez que as imagens que tem sido utilizadas com frequência em estudos de corpos d'água, caracterizam-se por resoluções espectrais similares

Como relatado anteriormente, a pesquisa previa a aquisição quase simultânea de uma imagem multiespectral de alta resolução espacial do satélite Ikonos II, em relação ao levantamento amostral em campo. A simultaneidade dos dados coletados "in situ" com a imagem de satélite é importante no desenvolvimento das análises previstas, devido à dinâmica que ocorre em corpos d'água, onde condições do céu (sol ou nuvens), além da presença de ventos e ondas interferem diretamente nos componentes da água (BARBOSA, 2005).

A imagem tomada em 05 de fevereiro pelo satélite Ikonos II foi a disponibilizada para a presente pesquisa, enquanto o trabalho de campo ocorreu nos dias 07 e 08 de fevereiro, portanto, defasado em 2 e 3 dias da tomada da cena. Essa imagem encontra-se em elevado grau de cobertura de nuvens, e sobre parte considerável do reservatório, o que torna seu uso limitado. Uma nova imagem, sem cobertura de nuvens, foi disponibilizada para uso na pesquisa, porém adquirida em 10 de março de 2007, ou seja, com uma defasagem temporal de 31 dias do levantamento de campo. Embora haja uma considerável diferença em termos de características, composição do corpo d'água e resposta espectral da água, pretende-se usar a cena sem nuvens para observar se há correlações entre os dois períodos analisados, realizando-se inferências sobre parte do reservatório na qual não foi possível a coleta de dados espectrais, em ambas as imagens.

Portanto, as imagens Ikonos das duas datas de tomada foram submetidas à correção atmosférica, radiométrica e geométrica, visando torná-las comparáveis aos outros dados (limnológicos e espectrais). Uma máscara foi utilizada para isolar o corpo d'água do solo na parte oeste do reservatório, na imagem de fevereiro, quando não havia ocorrência de



nuvens cobrindo os pontos amostrais da água. Nos dados referentes a essa máscara, foi aplicado Razão e Diferença de Bandas, para posterior verificação de correlação com as variáveis limnológicas e espectros.

Verificada a correlação entre a imagem de fevereiro e os dados espectrais e limnológicos tomados “in situ”, modelos empíricos de regressão linear clássica foram analisados, correlacionando todas essas variáveis com a imagem de fevereiro. Inferências foram realizadas para parte do reservatório para a qual não se dispunha dos espectros em fevereiro, e para a imagem Ikonos disponível em março.

O mapeamento das variáveis limnológicas, cuja inferência utilizou dados extraídos das imagens multiespectrais foi realizado.

## **6 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISES**

### **6.1 Levantamento “in situ”**

Para a realização da coleta de dados limnológicos e espectrais “in situ” foi necessária a compreensão de que o reservatório em estudo, assim como os demais na natureza, apresenta características relacionadas com a qualidade da água que variam de maneira complexa e interdependente ao longo de sua extensão. Além disso, observou-se que na maioria das pesquisas limnológicas realizadas em grandes reservatórios (PAGIORO, 1999; BRIVIO et al., 2001; LIBOS et al, 2005) e no monitoramento realizado pelos órgãos oficiais responsáveis pela análise da qualidade das águas em rios e bacias hidrográficas no Estado de São Paulo, como a CETESB, a quantidade de pontos levantados e espaçados aleatoriamente parece não ser suficiente para avaliar tais características e suas correlações, principalmente quando há interesse de integração de dados espectrais na pesquisa visando a geração de modelos empíricos ou semi-analíticos.

Portanto, foi definido um esquema de amostragem para a coleta de dados “in situ” que considerou um número de pontos, permitisse a otimização do levantamento e garantisse, ao mesmo tempo, a representatividade espacial dos parâmetros coletados para a análise da qualidade da água nesses ambientes.

Desse modo, a coleta de dados limnológicos e espectrais “in situ” foi realizada nos pontos definidos no esquema de amostragem, devidamente posicionados com



receptores GPS de precisão e de navegação, e de modo a garantir alguma simultaneidade na tomada das medidas espectrais e coleta de amostras de água.

### 6.1.1 Delineamento Amostral

Como descrito nos itens 5.1 e 5.2, as imagens orbitais utilizadas para traçar o delineamento amostral para aquisição de medidas e coleta no corpo d'água foram: Landsat/TM e ETM+, tomadas em maio de 1985 e maio de 2003, respectivamente, representando o período de seca; e CBERS/CCD, adquiridas em fevereiro de 2005 e janeiro de 2006, representando o período de cheia; além da imagem Ikonos de abril de 2001, utilizada para o georreferenciamento das cenas das imagens anteriores. As cenas Landsat e Cbers foram selecionadas a partir da disponibilidade de imagens temporais para a área de estudo e para uso na pesquisa, uma vez que, no momento da elaboração desta etapa, as imagens TM/Landsat não tinham disponibilidade de distribuição gratuita, além da grande dificuldade em se obter imagens sem cobertura de nuvens sobre a região do reservatório de Itupararanga.

As imagens Landsat e Ikonos foram disponibilizadas por projeto coordenado pela Unesp – FCA (Faculdade de Ciências Agrárias) para o Fehidro (Fundo Estadual de Recursos Hídricos), enquanto as imagens CBERS foram obtidas através de *download* do “*site*” do INPE.

As bandas espectrais utilizadas, independentemente do satélite/sensor usado na aquisição da imagem multiespectral, foram definidas levando em consideração as faixas espectrais que permitem verificar variações na água, alvo de interesse nesse estudo, embora os sensores TM e ETM+/Landsat disponibilizem sete faixas espectrais. As faixas espectrais usadas neste trabalho são indicadas na Tabela 3.



Tabela 3 – Intervalos espectrais das bandas para os sensores Ikonos, CCD/Cbers e TM e ETM/Landsat

<b>Banda</b>	<b>Faixa espectral IKONOS (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Faixa espectral CCD/Cbers (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Faixa espectral TM e ETM/Landsat (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Banda 1 (luz azul) - visível	0,45 – 0,52	0,45 – 0,52	0,45 – 0,52
Banda 2 (luz verde) - visível	0,52 – 0,60	0,52 – 0,59	0,52 – 0,60
Banda 3 (luz vermelho) - visível	0,63 – 0,69	0,63 – 0,69	0,63 – 0,69
Banda 4 (luz infravermelho próximo)	0,76 – 0,90	0,77 – 0,89	0,76 – 0,90

Cada uma das quatro bandas das imagens TM e ETM+/Landsat e CCD/Cbers foram então georreferenciadas com base na imagem Ikonos de 2001, no programa Spring. O georreferenciamento ou registro no Spring é uma transformação geométrica que relaciona coordenadas de imagem (linha, coluna) com coordenadas de um sistema de referência, que é o sistema de coordenadas planas de uma projeção cartográfica. Foi possível localizar com boa definição e uma distribuição que permitisse boa geometria de ajuste, apenas 10 pontos de controle em ambas as imagens. A transformação utilizada no Spring para o registro da imagem-imagem foi a Transformação Afim no plano, que, segundo Luginani (1987) possui 6 parâmetros de transformação e portanto 6 incógnitas, sendo teoricamente suficientes apenas 3 pontos de controle para a sua aplicação, uma vez que cada ponto no plano gera duas equações matemáticas na transformação. O registro imagem-imagem apresentou uma precisão de 0,9 pixel, para a imagem Landsat e 0,8 pixel para a imagem Cbers, valores considerados aceitáveis para o trabalho.

Após o georreferenciamento, foi gerada uma máscara para definir o limite terra/água, delimitando o perímetro do reservatório. Para gerar essa máscara aplicou-se uma técnica de segmentação por crescimento de regiões à banda 4, com similaridade igual a 12 e área igual a 20 pixels, nas imagens CBERS de fevereiro de 2005 e janeiro de 2006 (período de cheia), para verificar qual dessas duas datas tinha a maior área de inundação. A imagem de fevereiro de 2005 foi a selecionada e, a partir dela foi definido o limite do reservatório.

Realizou-se, então o recorte de cada uma das bandas espectrais (Planos de Informação – PI) referentes às quatro datas das imagens Landsat e CBERS.



Utilizou-se a técnica de classificação não-supervisionada, disponível no Spring, denominada Iseseg para agrupar as regiões definidas na segmentação. O valor de limiar adotado foi de 90%.

Segundo Lamparelli et al. (2001) existem diversos esquemas amostrais a serem considerados, dependendo das características da região e da natureza do fenômeno a ser avaliado. Eles podem ser: *regular* ou *sistemático*, em que a coleta de elementos é feita em pontos igualmente espaçados e homoganeamente distribuídos por toda a região considerada; *aleatório*, onde os pontos são fixados aleatoriamente por toda a região, e não há problemas de viés, já que o princípio de aleatorização anula qualquer efeito de padrões existentes; e *aleatório estratificado* ou *sistemático não alinhado*, em que os elementos amostrais cobrem toda a área de interesse preservando, entretanto, a casualidade. Nesse último esquema, divide-se a região a ser amostrada no número de pontos a ser obtido e na seqüência é gerado aleatoriamente um ponto em cada uma das sub-regiões. Esse esquema combina o baixo potencial para tendências do esquema *aleatório* com a propriedade de maior cobertura geográfica do padrão *sistemático*.

A definição dos elementos amostrais, no presente trabalho, foi realizada a partir de técnicas de amostragem geradas em função disponível no aplicativo Idrisi. Essa ferramenta insere os pontos na área desejada, aleatoriamente, a partir da escolha do método e do número de pontos.

As técnicas de amostragem testadas nesta pesquisa foram a amostragem sistemática e a sistemática não-alinhada, com tamanhos iniciais de amostras diferentes, aplicadas à área da represa, ou seja, a área correspondente ao contorno de maior inundação entre os períodos estudados – fevereiro de 2005.

Após a sistematização dos pontos foi realizada uma estratificação dos mesmos, com base na análise integrada das imagens de seca e cheia, observando-se se as localizações dos pontos coincidiam com as regiões de transição e de maior variação espectral ao longo do tempo. Essa estratificação se baseia em Thompson (2002) que define esquemas amostrais variáveis de acordo com o custo para se otimizar a coleta de uma amostra. Segundo o autor, o esquema ideal de estratificação aloca tamanhos amostrais maiores, nas regiões mais significativas ou mais variáveis, e tamanhos amostrais menores nas regiões mais caras ou difíceis de amostrar. Nesse caso, considerou-se que as áreas que apresentaram maior variação



espectral e de transição ao longo do tempo, deveriam ter maior número de elementos amostrais alocados.

As Figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam o resultado das classificações não-supervisionadas geradas para as quatro datas das imagens temporais avaliadas, respectivamente, fevereiro de 2005; janeiro de 2006; maio de 2003 e maio de 1985.

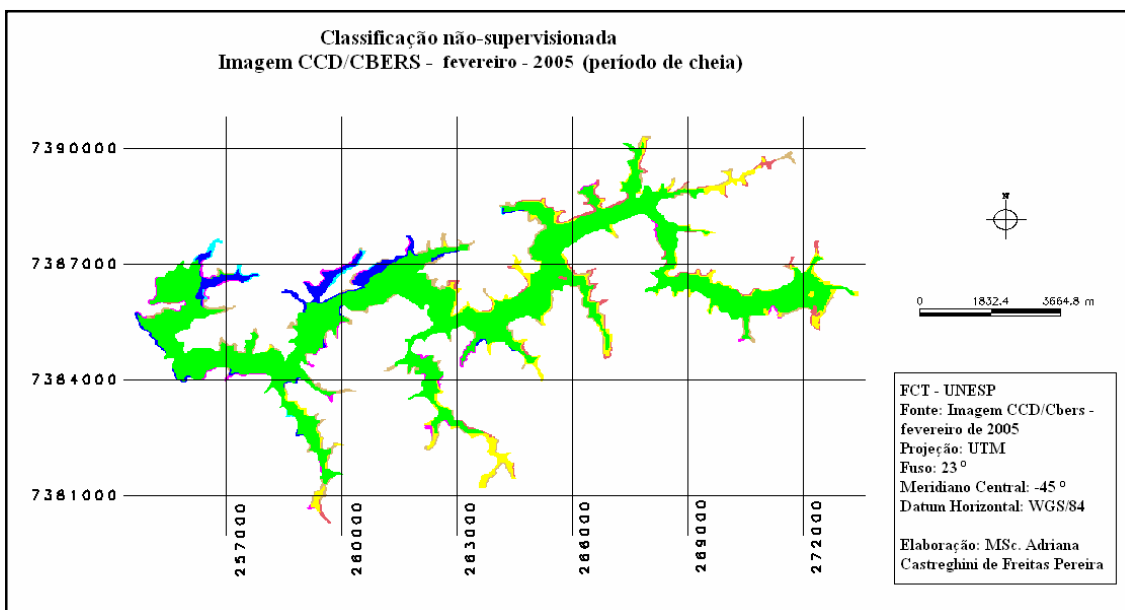


Figura 11 – Classificação não-supervisionada do reservatório de Itupararanga/SP, gerada para a imagem CCD/CBERS de fevereiro de 2005 (período de cheia)

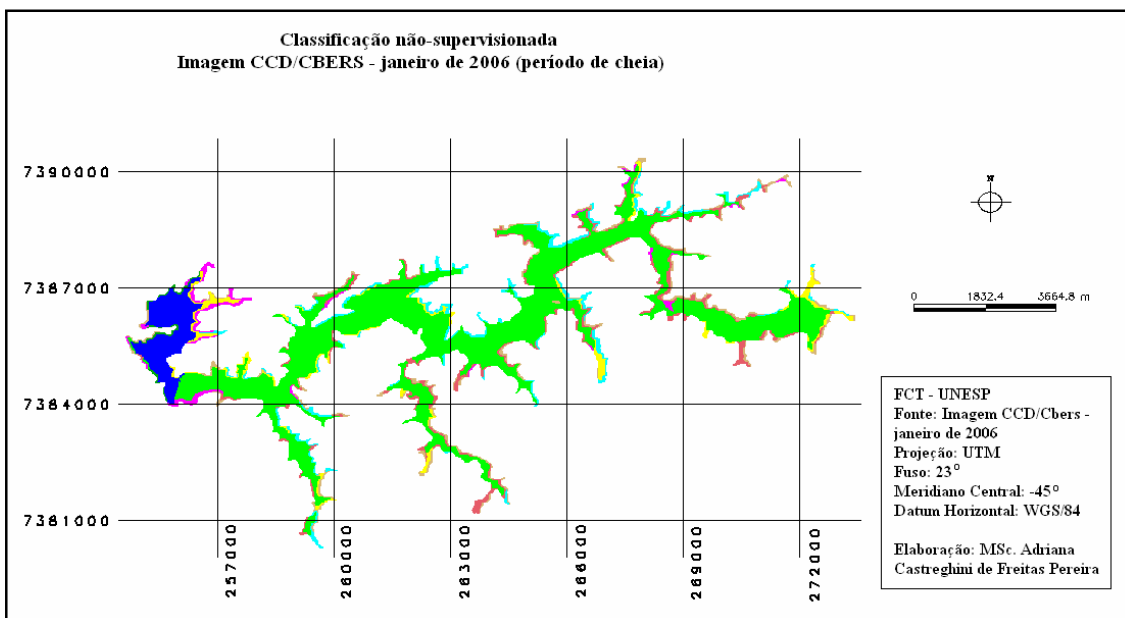


Figura 12 – Classificação não-supervisionada do reservatório de Itupararanga/SP, gerada para a imagem CCD/CBERS de janeiro de 2006 (período de cheia)

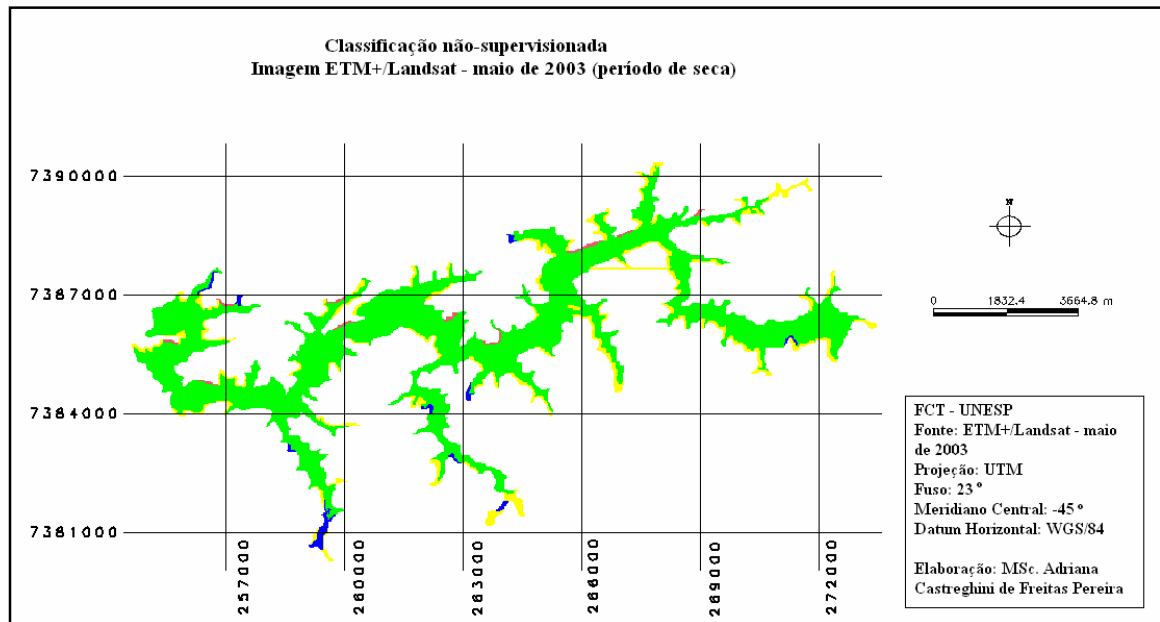


Figura 13 – Classificação não-supervisionada do reservatório de Itupararanga/SP, gerada para a imagem ETM+/Landsat de maio de 2003 (período de seca)

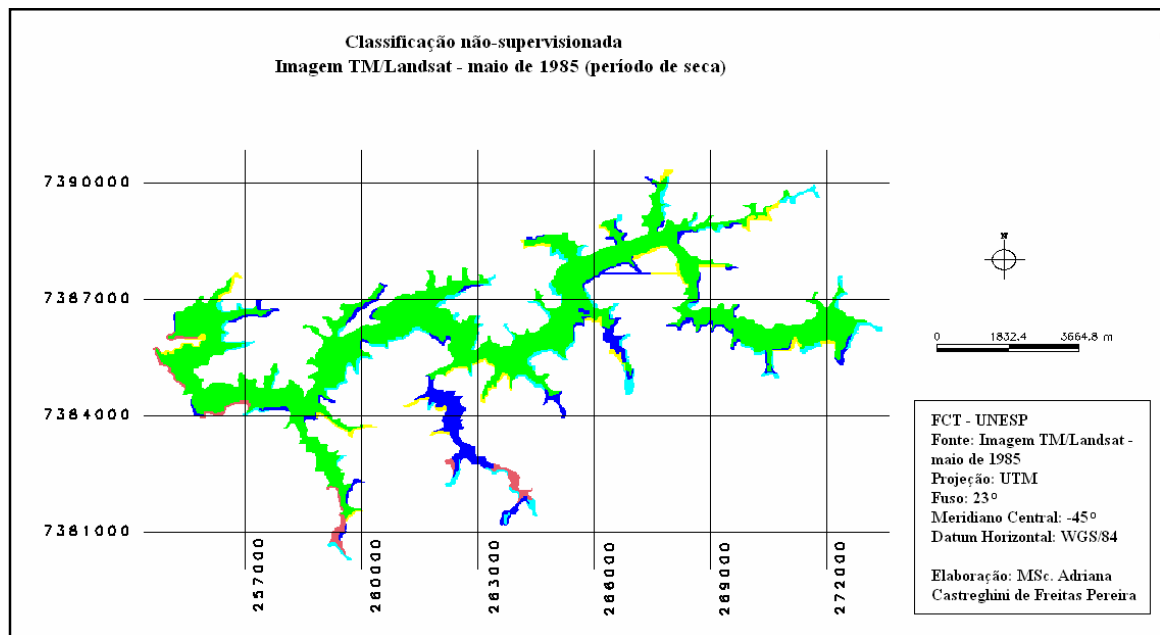


Figura 14 – Classificação não-supervisionada do reservatório de Itupararanga/SP, gerada para a imagem TM/Landsat de maio de 1985 (período de seca)



Nas Figuras 11 a 14, as áreas homogêneas ao longo do período de tempo analisado, aparecem na cor verde e são, de um modo geral, representadas pelo curso principal do reservatório. As áreas de transição e as heterogêneas aparecem nas cores azul, amarelo, rosa, entre outras.

Fazendo-se a integração das classificações do período de cheia (janeiro de 2006 e fevereiro de 2005) e de seca, (maior de 2003 e maio de 1985), usando o aplicativo Idrisi, foi possível observar as regiões do reservatório com características espectrais da água mais homogêneas, menos homogêneas e regiões de transição, ao longo do período de tempo pesquisado, ou seja, de 1985 a 2006.

Após os testes realizados com as duas técnicas de amostragem já citadas e números iniciais de pontos diferentes, selecionou-se uma distribuição de elementos amostrais de maneira sistemática não alinhada, pelo fato de garantir cobertura da área, preservando a casualidade, definindo-se 195 pontos iniciais sobre o reservatório. Em seguida, aplicou-se uma estratificação nesses pontos, realocando suas posições espaciais, conforme a análise das imagens dos períodos de cheia e seca indicavam maior ou menor homogeneidade e transição entre elas. Assim, os pontos foram realocados em maior número nas áreas menos homogêneas e de transição e reduzidos das áreas mais homogêneas.

Analisando-se a Figura 15, que representa a imagem de sobreposição para o período de cheia, verifica-se que o curso principal da represa apresenta-se bastante homogêneo nas duas datas analisadas (cor azul), enquanto que as regiões de transição e menos homogêneas encontram-se na cabeceira do reservatório (cor laranja) e principalmente nas extremidades, onde há contribuição de afluentes no reservatório (cores azul, verde, amarelo, entre outras). Nessa imagem foram geradas 53 classes de cores diferentes, o que significa uma maior heterogeneidade da água no período de águas altas. Nesse caso, os pontos foram concentrados nas regiões onde houve mudanças e em menor número nas regiões mais homogêneas, como no curso principal do reservatório.



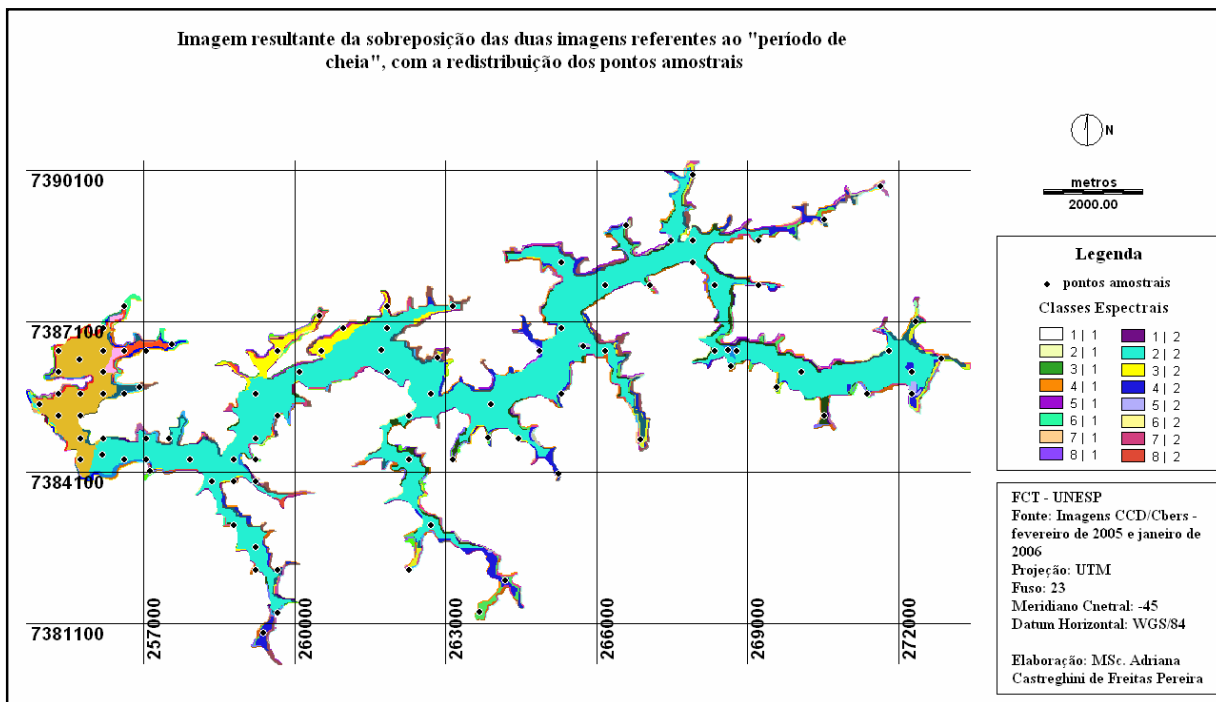


Figura 15 – Imagem resultante da sobreposição das duas imagens referentes ao *período de cheia* para o reservatório de Itaparanga/SP, com a redistribuição dos pontos amostrais

Na Figura 16, que representa a imagem de sobreposição para o período de seca, verifica-se que o curso principal do reservatório apresenta-se bastante homogêneo nessas duas datas analisadas (cor roxa), ocorrendo homogeneidade também na cabeceira do reservatório, diferentemente do que ocorreu no período de cheia, embora algumas áreas de entrada de afluentes tenham apresentado heterogeneidade bastante significativa ao longo do período de tempo analisado, como pode ser verificado nas cores amarela, verde, azul escuro, marrom e rosa da imagem. Nessa imagem foram geradas apenas 23 classes de cores diferentes, o que significa dizer que as áreas, nas duas datas pesquisadas para seca, apresentaram-se mais homogêneas. Portanto, os pontos foram concentrados em maior número nessas regiões onde houve mudanças ao longo do tempo analisado e em menor número nas regiões mais homogêneas, ou seja, no curso principal do reservatório.

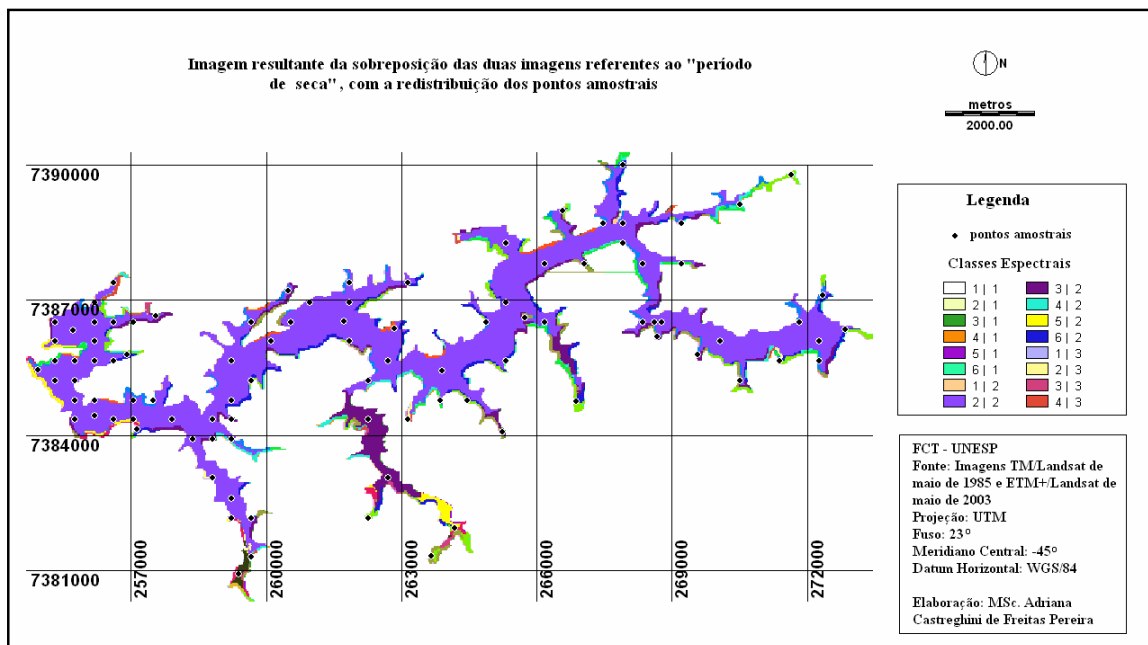


Figura 16 - Imagem resultante da sobreposição das duas imagens referentes ao *período de seca* para o reservatório de Itupararanga/SP, com a redistribuição dos pontos amostrais

No total foram definidos 72 pontos amostrais espalhados ao longo do reservatório de Itupararanga/SP, e na entrada de tributários, garantindo a representação das características limnológicas e espectrais a serem levantadas em campo, a partir da análise conjunta das duas imagens apresentadas nas Figuras 15 e 16.

Na Figura 17, a seguir, observa-se o mapa gerado para a realização do trabalho de campo, com as coordenadas geográficas que serviram para a navegação dos pontos sobre o reservatório.

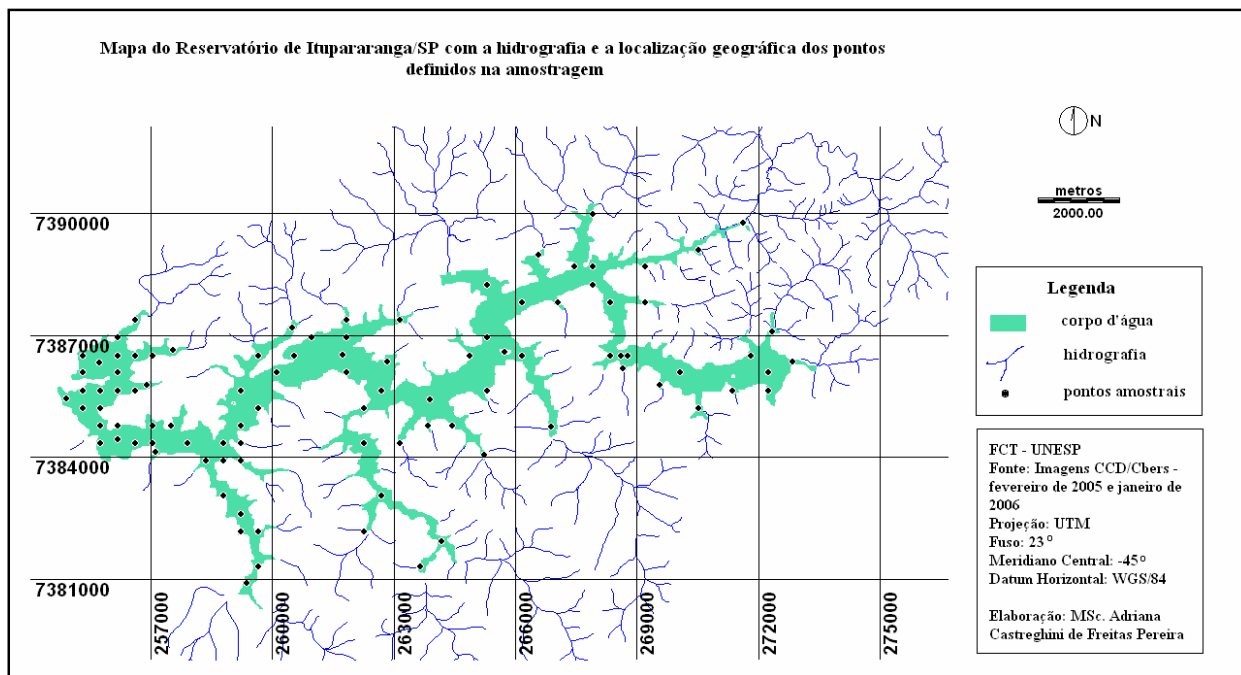


Figura 17 – Mapa do reservatório de Itupararanga, com a hidrografia e a localização geográfica dos pontos definidos na amostragem

### 6.1.2 Posicionamento Geodésico

Em cada ponto definido no esquema amostral, foi rastreado em campo o posicionamento de precisão dos mesmos. Para isso, foi estabelecida uma base a partir da implantação de um marco geodésico (marco de concreto) e o posicionamento do ponto foi feito utilizando um receptor de precisão de dupla frequência Hyper da Topcon. A base localiza-se no município de Piedade, dentro da propriedade da Pousada Primavera. Essa estação (base) foi denominada “Pousada” e pode ser observada na Figura 18.



Figura 18 – Marco geodésico implantado como base em Piedade/SP

Um outro receptor de precisão, porém de simples frequência, o 4600 LS da Trimble, foi utilizado para levantamentos dos pontos de interesse na represa de Itupararanga.

Na lancha, que foi utilizada como veículo de transporte dentro da represa, para a coleta dos dados, instalou-se o receptor 4600 numa haste de ferro como pode ser observado na Figura 19.



Figura 19 – Lancha com pessoal, GPS 4600 e equipamentos de coleta de dados “in situ”

O método de posicionamento adotado foi o relativo estático, cujo tempo necessário para o rastreamento foi de 5 minutos em cada ponto. Para a localização dos pontos pré-determinados no esquema amostral, utilizou-se o receptor de navegação Garmin 12XL. O processamento dos dados GPS foi realizado através do programa TGO da Topcon e posteriormente pelo programa GPSurvey 2.35 da Trimble.

Cabe ressaltar que a maioria das pesquisas relacionadas com coleta de variáveis limnológicas (BARBOSA, 2005; CAVENAGHI, 2003, ROCHA, 2002; PAGIORO, 1999; entre outros) utiliza posicionamento dos pontos dentro do corpo d'água usando receptores GPS de navegação, que tem uma precisão mais baixa do que os receptores de precisão de simples e dupla frequência. Neste trabalho, optou-se pelas duas alternativas para que se possa analisar se a qualidade do posicionamento utilizando esses receptores traz uma contribuição em termos de precisão de localização dos pontos ou se a diferença entre esses dois tipos de posicionamento não é relevante para estudos em corpos d'água. Para esse teste, realizou-se também o posicionamento dos pontos com o receptor de navegação Garmin 12XL.

Os resultados do processamento da qualidade do levantamento GPS referente à base, alcançaram a precisão desejada, ou seja, os erros resultantes foram da ordem centimétrica e as coordenadas resultantes foram: E = 23° 43'00,3686" S e N = 47° 23'44,28257"O.

O mesmo não ocorreu com o resultado do processamento dos dados levantados pelo receptor 4600, através do método relativo estático. Como o levantamento foi realizado através de uma lancha, as condições de forte vento e chuva, principalmente no segundo dia de trabalho, não permitiram que a lancha permanecesse estática. O tempo instável ocasionou a formação de ondas na repesa, o que causou um arraste no posicionamento.

Portanto, o processamento dos pontos foi dificultado, uma vez que, com o arraste, o receptor coletou diversas coordenadas, como num levantamento cinemático contínuo, o que resultou em erros da ordem de 100 m. Diante disso, optou-se em processar os dados com o método relativo cinemático pós-processado, onde se tem como observável fundamental a fase da onda portadora, e pode-se realizar um processamento pós-coleta dos dados (MÔNICO, 2000). Para tanto, utilizou-se o programa GPSurvey 2.35, através do qual se obteve os resultados para as linhas de base que ligam os pontos de coleta ao ponto "Pousada" (estação de referência) com valores na ordem do centímetro, ou seja, alcançando a precisão desejada.



Realizou-se uma análise comparativa entre os pontos amostrais levantados com os receptores de precisão 4600 e o de navegação Garmin 12 XL, objetivando verificar as diferenças de precisão entre os dois equipamentos, para pontos levantados dentro do corpo d'água, tomando-se como verdade terrestre os pontos levantados pelo receptor de precisão 4600. Cabe ressaltar, que alguns pontos amostrais não puderam ser medidos com o receptor de navegação, o que reduziu o número da amostra a 63 pontos.

A Figura 20 apresenta as curvas das coordenadas N levantadas pelos dois receptores, o de precisão (4600) em azul e o de navegação (Garmin) em rosa. Na Figura 21 são mostradas as curvas das coordenadas E levantadas pelos dois receptores, nos 63 pontos.

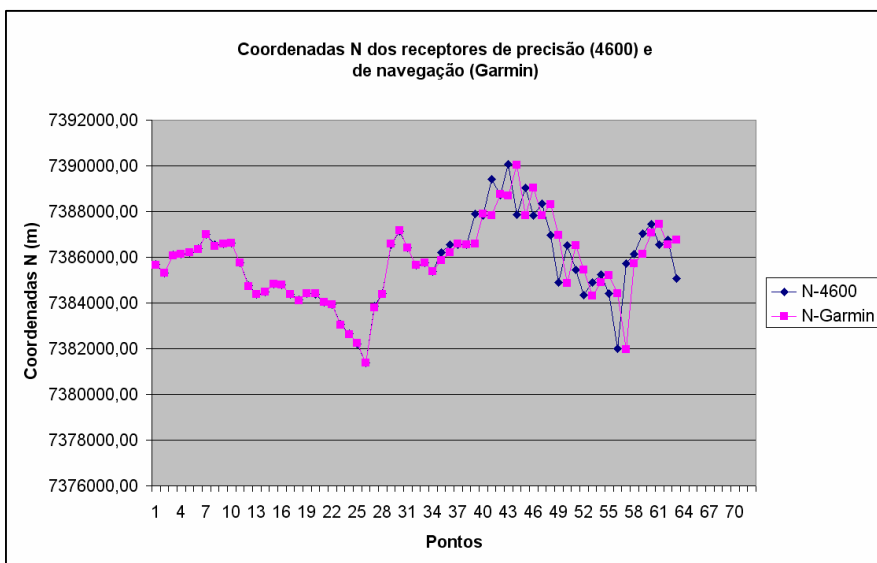


Figura 20 – Curvas das coordenadas N posicionadas nos pontos amostrais com os receptores de precisão e de navegação

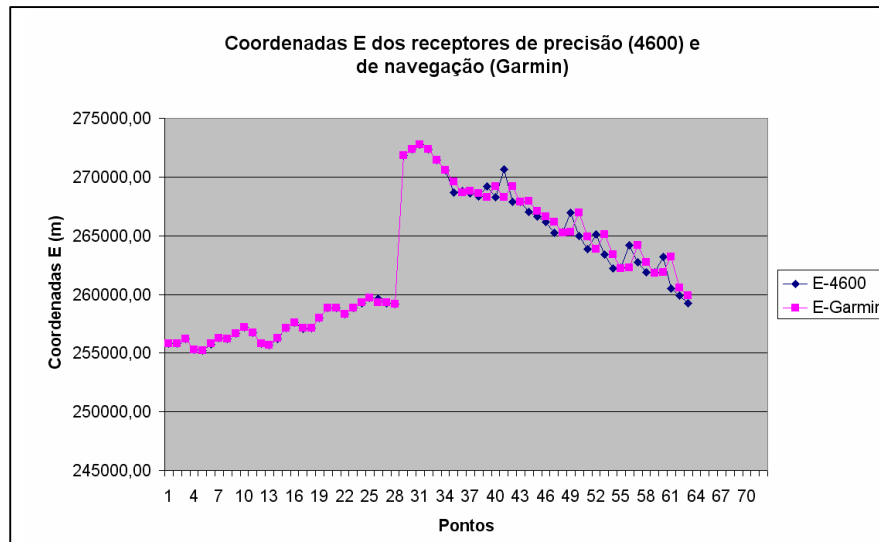


Figura 21 – Curvas das coordenadas E posicionadas nos pontos amostrais com os receptores de precisão e de navegação

Analisando-se as Figuras 20 e 21, e fazendo a correspondência com a localização geográfica dos pontos amostrais da Figura 17 (onde os círculos menores correspondem aos pontos com discrepância nula e os círculos maiores, aos pontos com discrepâncias consideráveis), verifica-se que os pontos amostrais que apresentam maiores discrepâncias tanto em N quanto em E concentram-se no centro e a nordeste da represa, e representam 30% do total. Esses pontos foram posicionados no segundo dia de trabalho de campo, quando as condições de forte vento e chuva torrencial predominaram durante todo o período de coleta. Para os demais pontos, maior número posicionado no primeiro dia de trabalho de campo, com boas condições climáticas, as discrepâncias foram praticamente nulas, confirmando a hipótese de que o mau tempo prejudicou o levantamento do segundo dia, causando o deslocamento da embarcação e conseqüentemente, o arraste dos pontos (Figura 22); além de aumentar as discrepâncias entre o posicionamento de ambos os receptores.

Observa-se que o posicionamento com o receptor de navegação apresentou bons resultados para trabalhos em corpos d'água, visto que em 70% dos pontos amostrais as discrepâncias calculadas foram praticamente nulas.

Portanto, pode-se verificar que a escolha do receptor GPS que proporciona melhores resultados no posicionamento dos pontos amostrais no corpo d'água depende de vários fatores, como as condições climáticas durante o posicionamento, o tempo de

permanência em cada ponto, a disponibilidade de uso de receptores de precisão de simples e dupla frequência, o tempo de coleta sincronizado dos dados limnológicos e espectrais, e, por fim, os custos que tais escolhas acarretarão no projeto.

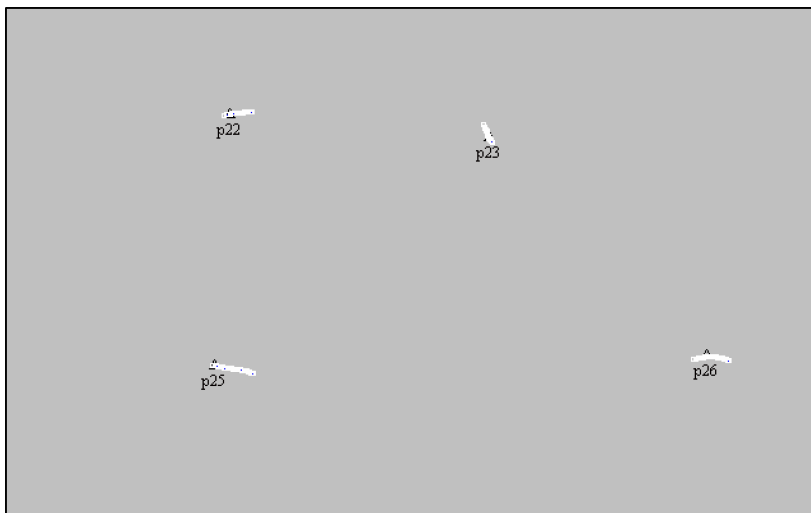


Figura 22 – Detalhe do posicionamento relativo estático dos pontos, mostrando arraste da embarcação, devido a fortes ventos e chuva

Além disso, como a coleta de dados espectrorradiométricos com o FieldSpec depende da luminosidade solar para registrar os valores espectrais da água e o período de ensolação plena durante o dia ocorre entre 9:30 e 14:30 horas, é imprescindível um bom planejamento de campo para que seja possível a realização de todas as medidas nesse período de tempo mais adequado para sua coleta.

### 6.1.3 Coleta de dados limnológicos

A coleta de dados limnológicos “in situ” utilizou disco de Secchi para a medida de transparência da água, e coleta e conservação de amostras de água para os parâmetros: TSS, Turbidez e Condutividade elétrica. Como as variáveis foram avaliadas na profundidade de Secchi, a coleta foi feita com coletores de fluxo contínuo, onde a água era succionada através de uma mangueira de 30 m de comprimento, marcada de metro em metro, e liberada dentro de garrafas plásticas para amostragem de água. Segundo Cavenaghi (2003), o uso deste tipo de coletor aumenta a estabilidade e a representatividade dos resultados obtidos, por não permitir o turbilhonamento da amostra no momento de coleta.

A transparência da água nos pontos de coleta foi medida através da profundidade do disco de Secchi. A água foi então coletada através dos coletores de fluxo contínuo, na profundidade indicada pelo disco de Secchi, para os 72 pontos definidos no esquema amostral. As amostras de água de cada ponto foram conservadas em isopor com gelo e levadas ao laboratório da FCA/Unesp para posterior análise.

As análises foram feitas para os seguintes parâmetros: condutividade elétrica e turbidez, analisadas em laboratório com condutivímetro e turbidímetro, respectivamente, segundo (CAVENAGHI, 2003), e para sólidos suspensos, segundo métodos apresentados por Eaton et al (1998). Os valores resultantes das análises são apresentados no Apêndice A. A síntese da estatística descritiva de tais variáveis é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Síntese das estatísticas descritivas para as variáveis limnológicas coletadas

<b>Variável</b>	<b>Média</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>Referência*</b>
<i>Profundidade Secchi (m)</i>	1,92	0,90	3,00	0,60	-
<i>Turbidez (NTU)</i>	1,91	0,21	5,81	1,46	100 NTU
<i>TSS (mg/L)</i>	0,19	0,02	1,73	0,21	-
<i>Condutividade (<math>\mu</math>S/cm)</i>	80,08	63,3	85,20	4,71	-

\* valores de referência segundo a resolução CONAMA 357/2005 para classe II

Na Tabela 4, a coluna denominada referência representa os valores máximos permitidos pela legislação, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/05 para águas destinadas ao abastecimento doméstico, recreação e irrigação de hortaliças, considerando a classe que se enquadra o reservatório de Itupararanga (classe II). Analisando esses parâmetros de referência, verifica-se que somente a variável turbidez apresenta valores de referência nessa resolução, sendo que o valor resultante desta apresentou-se muito inferior àquele especificado como limite padrão para a classe.

Por definição, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) mede a possível relação linear existente entre as variáveis aleatórias, de maneira que seja sempre um valor entre -1 e 1; quanto maior a tendência de uma relação linear positiva, a correlação tem valor mais próximo de 1; quanto maior a tendência de uma relação linear negativa, a correlação tem valor mais próximo de -1; e quando a correlação está próxima de zero, não existe relação



linear (CHARNET et al., 1999). O p-valor é a probabilidade estatística usada nos testes de hipótese para auxiliar na decisão de rejeição ou aceitação da hipótese nula. O p-valor se relaciona diretamente com nível de significância,  $\alpha$ , que geralmente é fixado em 5%. Então, se a probabilidade p-valor for menor que 0,05 há evidências que a hipótese nula é falsa. Magalhães & Lima (2002) definem p-valor ou nível descritivo como a probabilidade de se obter estimativas mais desfavoráveis ou extremas, supondo que a hipótese nula seja verdadeira, do que a que está sendo fornecida pela amostra. Valores pequenos de p-valor evidenciam que a hipótese nula é falsa.

A análise do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) foi aplicada entre as variáveis limnológicas, a fim de verificar se duas delas definem um comportamento similar no reservatório em estudo. A Tabela 5 apresenta a matriz de correlação entre as variáveis limnológicas Sólidos em Suspensão (TSS), Turbidez, Profundidade de Secchi e Condutividade Elétrica.

Tabela 5 - Correlações entre as variáveis limnológicas

	<b>TSS</b>	<b>Turbidez</b>	<b>Secchi</b>	<b>Cond. Elétrica</b>
<b>TSS</b>	1 (0)			
<b>Turbidez</b>	-0,117 (0,33)	1 (0)		
<b>Secchi</b>	0,116 (0,33)	-0,519 (0)	1 (0)	
<b>Cond. Elétrica</b>	0,155 (0,19)	-0,429 (0)	0,746 (0)	1 (0)

Observa-se na Tabela 5 que a variável Turbidez apresenta correlação significativa a um nível de significância de 5% e negativa, com a profundidade do disco de Secchi (-0,519;  $p = 0 < 0,05$ ), o que significa que essas variáveis são inversamente proporcionais, ou seja quanto maior a profundidade do disco de Secchi, menor será a turbidez, e que 51,9% das variações em Turbidez são explicadas pela profundidade de Secchi. Com a variável Condutividade Elétrica, a turbidez também relaciona-se negativamente, porém com um valor mais baixo (-0,429;  $p = 0$ ), demonstrando que quanto mais turva a água menor será o valor da condutividade elétrica e que 42,9% das variações em Turbidez são explicadas pela condutividade elétrica na água. As variáveis Profundidade de Secchi e Condutividade Elétrica estão correlacionadas com  $r = 0,746$ ;  $p = 0$ ), sendo estatisticamente significativas ao nível de 5%, e que 74,6% das variações em Profundidade de Secchi ocorre são explicadas pela



condutividade elétrica. As correlações entre Sólidos em suspensão (TSS) e as demais variáveis não foram significativas ao nível de 5%.

A correlações próximas de zero, embora significativas a 5%, entre sólidos em suspensão e as demais variáveis limnológicas (Tabela 5) podem ser causadas pela ocorrência de concentrações muito baixas de sólidos em suspensão no reservatório de Itupararanga. Esse fato pode ser explicado pela formação rochosa da região do Estado de São Paulo onde encontra-se o reservatório, sendo constituída de maior porcentagem de areia e menor de argila, o que ocasiona uma deposição mais rápida da terra que é escoada para a água.

#### 6.1.4 Coleta de dados espectrais

As medidas espectrais foram feitas com o espectrorradiômetro FieldSpec®UV/VNIR (Analytical Spectral Devices, Inc.), com ângulo de visada de 25°, cobrindo uma área de aproximadamente 0,22 m<sup>2</sup>. O Fator de Reflectância foi calculado medindo-se a radiância espectral de uma placa de referência Spectralon® com reflectância constante de 99% em todos os comprimentos de onda, para calibração em laboratório. A radiância espectral da água em cada ponto foi obtida a partir da média de 3 integrações. Tentou-se manter a mesma geometria de visada para todos os pontos.

Embora o esquema de amostragem para coleta de dados “in situ” tenha sido criteriosamente definido, resultando em 72 pontos amostrais, a coleta dos espectros só foi possível em 35 desses pontos. Esse fato ocorreu devido às más condições do tempo, principalmente no segundo dia de campo, com chuvas torrenciais durante quase todo o período de coleta (das 9:54 às 15:58 horas). Em alguns momentos de estiagem, porém com presença de nuvens, foi possível a coleta de apenas quatro pontos espectrais nesse segundo dia.

As condições do tempo, com céu nublado e ondulações na superfície da água causadas pelo vento, prejudicaram as análises dos espectros tomados no corpo d’água, como pode ser observado na Figura 23, que apresenta as correlações entre as curvas espectrais dos 35 pontos e as variáveis limnológicas.



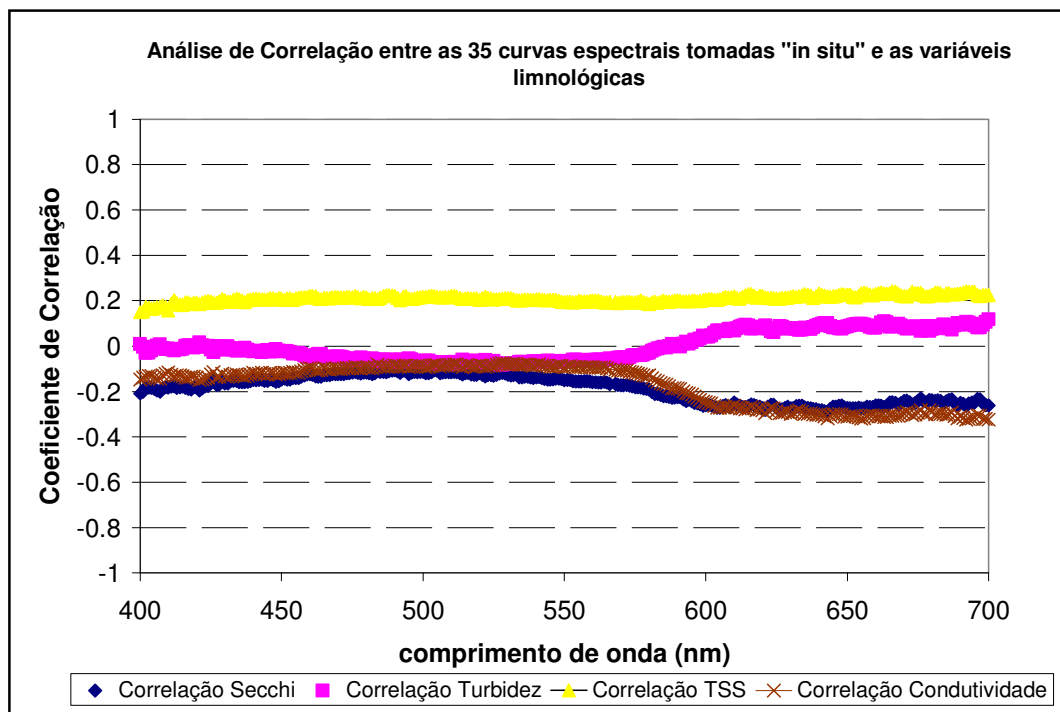


Figura 23 - Análise de Correlação entre as curvas espectrais dos 35 pontos coletados "in situ" e as variáveis limnológicas

Na Figura 23 verifica-se a baixa correlação entre os dados espectrais e limnológicos, com coeficiente de correlação variando entre aproximadamente -0,3 e 0,2.

Diante disso, algumas decisões foram tomadas com relação a amostra disponível, para que o trabalho pudesse ser desenvolvido, alcançando os objetivos traçados. Essas questões serão discutidas no item 6.2 a seguir.

## 6.2 Dados Espectrais: classificação da amostra segundo as condições do tempo

O planejamento do trabalho de campo é uma das etapas mais importantes na aquisição de dados espectrorradiométricos em corpos d'água, visto que a luz solar incidente e as características da superfície da água controlam o campo de luz submerso, e, desse modo, o grau com que as medidas espectrais representam as propriedades ópticas do corpo d'água. Nesse sentido, as condições meteorológicas influenciam diretamente na tomada dos espectros em campo e, portanto, na qualidade das informações espectrais.

As diferenças nas medidas de reflectância em campo ocorrem na ordem de 1 a 5% da irradiância que chega a superfície, em função de variações da concentração de



partículas em suspensão na atmosfera, presença de nuvens cirrus (invisível aos olhos) ou quando o Sol fica encoberto por grandes nuvens, causando as interferências mais significativas (MILTON, 1987). O maior ou menor efeito dessas variações de curto prazo tenderão a afetar mais ou menos as medidas em função do método de aquisição dos dados e dos sensores envolvidos. A sensibilidade do sensor utilizado é fundamental para a obtenção de resultados correlacionados entre as variáveis opticamente ativas, principalmente quando tais variáveis ocorrem em baixas concentrações no corpo d'água analisado. Tal sensibilidade é observada, por exemplo, em sensores com campo duplo de visada, que podem medir simultaneamente o alvo e a referência. Outros fazem medidas sequenciais da referência e da placa. Há também sensores que exigem maior tempo de integração do sinal, levando mais tempo para a aquisição das leituras do alvo e da placa, tornando as medidas mais precisas. A escolha do sensor mais adequado ao trabalho depende de fatores, como: disponibilidade do equipamento, custo, tempo disponível para coleta em campo, além das características dos componentes opticamente ativos do corpo d'água.

Pereira Filho et al. (2005) estudaram a interferência das condições de tempo (iluminação e vento) na reflectância da água, e concluíram que a presença de vento e céu nublado produz conseqüências opostas nos espectros de reflectância, sendo que o vento diminui o albedo e o céu nublado o aumenta. Também observaram que superfícies com ondas obliteram feições de absorção na faixa verde do espectro e diminuem a amplitude da feição de absorção associada à clorofila, para comprimentos de onda de 690 e 714 nm; o que tende a reduzir as correlações entre as medidas radiométricas e a concentração de sedimento inorgânico em suspensão. O céu nublado proporcionou um efeito aditivo, proveniente da irradiância difusa da atmosfera, em toda a faixa espectral de 400 a 900 nm.

Uma análise dos dados espectrorradiométricos coletados no Reservatório de Itupararanga/SP, a partir da observação das condições de iluminação (nebulosidade) e vento (formação de ondas na superfície da água) interferindo nesses espectros, foi realizada.

Os dados de campo, obtidos em 07 e 08 de fevereiro de 2007, foram coletados em 31 pontos, com presença de sol, nuvens e vento, no primeiro dia e, com ocorrência de chuvas torrenciais e alguns momentos de estiagem com nuvens, em apenas quatro, no segundo dia, totalizando 35 pontos amostrais. A Tabela 6 apresenta as amostras de campo com as respectivas condições do tempo e as variáveis limnológicas coletadas.



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP.

Tabela 6 - Amostras e condições do tempo no levantamento de campo - Reservatório de Itupararanga/SP

Am.	Data	Hora	Lat	Long	TSS (mg/l)	Turb. (NTU)	Prof. Secchi (m)	Cond. El. (µS/cm)	Cond. tempo
P1	07/02	10:58	-23° 37' 23"	-47° 24' 07"	0,160	0,86	3	85	Nublado sem sol
P3	07/02	11:22	-23° 37' 15"	-47° 23' 53"	0,235	0,77	2,70	84,90	Nublado Sem sol
P7	07/02	11:32	-23° 37' 15"	-47° 23' 36"	0,155	0,30	2,80	85,10	Nublado Sem sol
P8	07/02	11:40	-23° 37' 28"	-47° 23' 37"	0,130	0,21	2,70	84,20	Nublado Sem sol
P18	07/02	11:49	-23° 37' 15"	-47° 23' 21"	0,075	0,39	2,90	84,40	Nublado
P17	07/02	11:58	-23° 37' 01"	-47° 23' 22"	0,035	1,22	2,50	85,20	Nublado
P5	07/02	12:09	-23° 37' 00"	-47° 23' 53"	0,172	0,39	2,60	84,60	Nublado Sem sol
P2	07/02	12:15	-23° 36' 58"	-47° 23' 56"	0,105	0,36	2,60	84,80	Nublado
P6	07/02	12:24	-23° 36' 53"	-47° 23' 37"	0,195	1,06	2,60	84,10	Nublado Com sol
P12	07/02	12:34	-23° 36' 33"	-47° 23' 20"	0,065	0,43	2,40	84,80	Nublado
P14	07/02	12:51	-23° 36' 47"	-47° 23' 21"	0,295	1,04	2,50	84,30	Nublado
P15	07/02	12:59	-23° 36' 47"	-47° 23' 05"	0,170	0,29	2,40	84,60	Nublado
P16	07/02	13:06	-23° 36' 46"	-47° 22' 46"	0,210	0,98	2,20	85	Nublado
P19	07/02	13:35	-23° 37' 13"	-47° 23' 03"	0,170	0,55	2,20	84,10	Nublado com sol
P9	07/02	13:45	-23° 37' 44"	-47° 23' 37"	0,185	0,95	2,40	84,40	Nublado
P10	07/02	13:55	-23° 37' 57"	-47° 23' 41"	0,210	3,54	2,50	84,40	Nublado Com sol
P27	07/02	14:03	-23° 37' 54"	-47° 23' 21"	0,090	0,57	2,60	84,20	Sol
P21	07/02	14:10	-23° 37' 43"	-47° 23' 22"	0,160	1,26	2,40	84,20	Nublado com sol
P22	07/02	14:15	-23° 37' 44"	-47° 22' 50"	0,170	0,57	2,20	84,50	Sol
P23	07/02	14:26	-23° 37' 45"	-47° 22' 34"	0,275	1,02	2,30	84,40	Sol
P25	07/02	14:34	-23° 37' 58"	-47° 22' 51"	0,165	0,43	2,60	83,80	Sol
P28	07/02	14:40	-23° 38' 06"	-47° 22' 50"	0,385	0,97	2,20	83,30	Sol
P26	07/02	14:47	-23° 37' 58"	-47° 22' 20"	0,230	0,31	2,80	84,10	Sol
P30	07/02	14:51	-23° 37' 58"	-47° 21' 49"	0,240	1,31	2,50	82,50	Sol
P32	07/02	15:02	-23° 38' 10"	-47° 21' 50"	0,135	1,97	2	82,40	Sol
P31	07/02	15:12	-23° 38' 13"	-47° 22' 07"	0,045	1,03	2	82,30	Nublado Com sol
P34	07/02	15:19	-23° 38' 42"	-47° 21' 50"	0,460	0,46	2,10	83,40	Sol
P35	07/02	15:25	-23° 38' 56"	-47° 21' 36"	0,135	1,07	2,40	83,90	Sol
P36	07/02	15:32	-23° 39' 10"	-47° 21' 21"	0,130	0,32	2,10	84,90	Sol
P33	07/02	15:59	-23° 38' 16"	-47° 21' 35"	0,070	1,31	2,60	82,10	Sol
P29	07/02	16:06	-23° 37' 59"	-47° 21' 37"	0,680	0,90	1,90	81	Sol
P129	08/02	11:19	-23° 36' 54"	-47° 16' 14"	0,125	3,55	1,20	76,10	Nublado Sem sol
P117	08/02	12:06	-23° 35' 43"	-47° 16' 28"	0,260	2,43	1	67,70	Nublado Sem sol
P111	08/02	12:35	-23° 34' 59"	-47° 16' 27"	0,220	3,81	1,40	75,50	Nublado Sem sol
P104	08/02	13:13	-23° 35' 54"	-47° 18' 01"	0,200	1,94	1,70	75,80	Nublado Sem sol

Devido à heterogeneidade das condições de tempo nos dois dias de trabalho de campo, houve a necessidade de classificar a amostra segundo as condições meteorológicas no momento de sua aquisição, em quatro conjuntos, quais foram: conjunto 1: céu aberto e



vento fraco; conjunto 2: céu aberto e vento médio a forte; conjunto 3: céu nublado e vento fraco; conjunto 4: céu nublado e vento médio a forte. As quatro categorias de condições meteorológicas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação da amostra segundo as condições meteorológicas

	<b>Conjunto 1</b>	<b>Conjunto 2</b>	<b>Conjunto 3</b>	<b>Conjunto 4</b>
<b>Amostras</b>	03	10	12	10
<b>Condições céu</b>	aberto	aberto	nublado	nublado
<b>Vento</b>	fraco	médio	fraco	forte
<b>Onda</b>	pequena	peq./méd.	pequena	média/alta

Observou-se que os quatro conjuntos amostrais, cujos pontos foram agrupados de acordo com as condições de iluminação e vento observadas durante a obtenção das medidas, realmente definem diferenças nas curvas espectrais. Esta afirmação foi comprovada pela aplicação do teste não-paramétrico de médias para variáveis não normais (Siegel, 1975).

Com a finalidade de reduzir os efeitos dos ruídos de alta frequência observados na região útil dos espectros (400 a 700 nm), foram aplicados filtros de suavização que serão brevemente descritos a seguir.

### 6.2.1 Suavização dos dados espectrais

As curvas espectrais de reflectância da água do reservatório de Itupararanga apresentaram valores de reflectância entre 0% e 12%. Devido às condições do tempo heterogêneas quando da tomada dos espectros, com presença de nuvens, ventos e ondulações na superfície da água, ocorreu grande intensidade de ruídos de alta frequência nas curvas, como pode ser observado na Figura 24, que mostra o conjunto das curvas espectrais coletadas com o espectro-radiômetro nos 35 pontos amostrais. Observa-se nessa mesma figura um pico suave de reflectância entre os comprimentos de onda de 550 nm a 600 nm e um pico de absorção entre 600 nm e 630 nm.



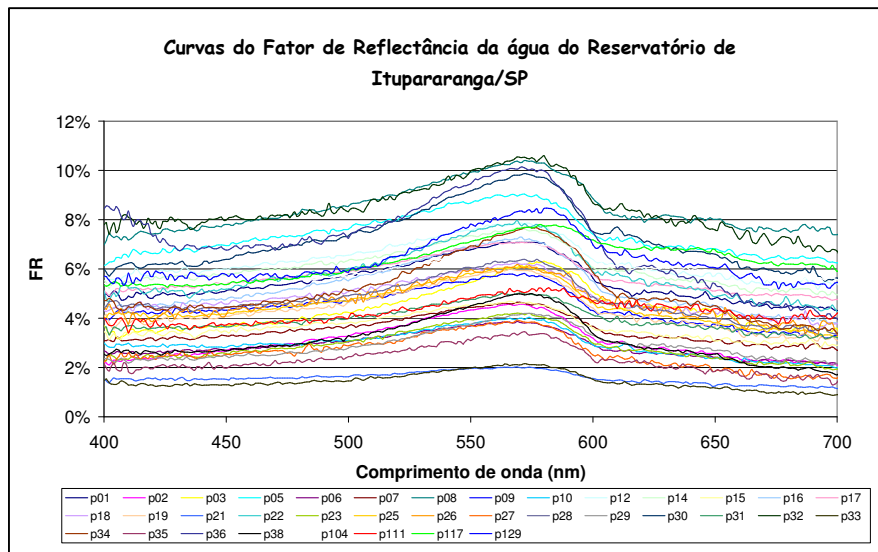


Figura 24 – Curvas Espectrais da água do Reservatório de Itupararanga/SP

De modo a remover os ruídos das curvas espectrais, foram testados filtros de suavização lineares de média móvel de três, quatro, cinco, sete e nove pontos ( TSAI & PHILPOT, 1998; RUDORFF, 2005), além da suavização por transformada de Fourier nos espectros de 400 nm a 700 nm, cujos resultados completos são apresentados no Apêndice B. Os dados a partir de 700 nm não foram considerados nas análises por apresentarem alta absorção por ruídos.

A fim de analisar o impacto de cada filtro de suavização sobre as feições de absorção e reflectância, foram geradas tabelas comparativas para os conjuntos de curvas, cujos picos e vales foram determinados aplicando-se a primeira derivada em todos os espectros. Além disso, fez-se necessário analisar as curvas espectrais a partir da observação dos comprimentos de onda diagnósticos de absorção de pigmentos, uma vez que estes estão relacionados a presença ou não de componentes opticamente ativos no corpo d'água, no caso o fitoplâncton. Para tanto, baseou-se nos estudos de Kirk (1994), Rundquist et al. (1996) e Barbosa (2005) sobre o comportamento do fitoplâncton nas curvas de reflectância espectral.

O filtro de suavização escolhido para cada curva foi aquele que reduziu o ruído aleatório sem alterar significativamente a posição das feições ( $\lambda_{max}$  e  $\lambda_{min}$ ) e o módulo

da derivada (valor máximo e valor mínimo). Análises mais aprofundadas são apresentadas no Apêndice B, porém apresenta-se a título de exemplo, o processo completo realizado para o ponto 28, o qual foi repetido para os demais.

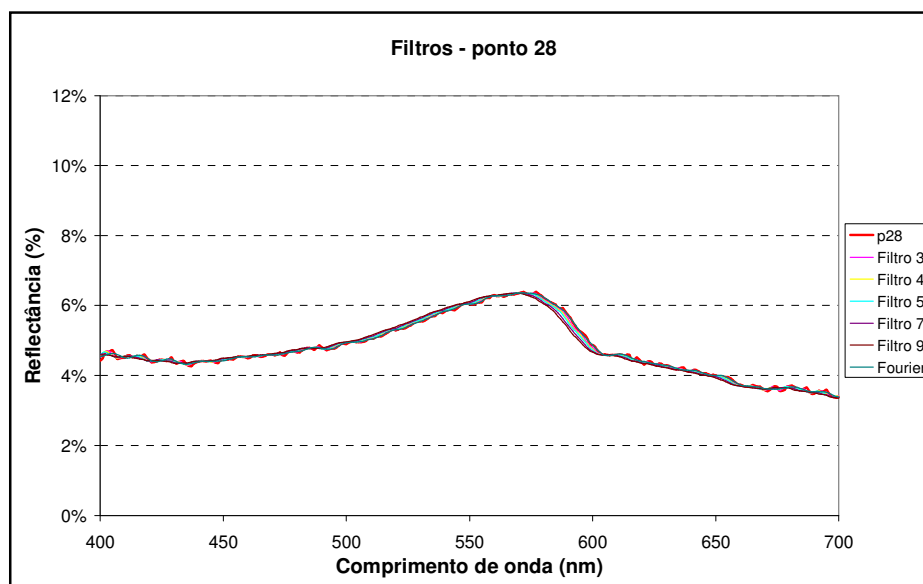


Figura 25 - Suavização por média móvel e transformada de Fourier aplicada às curvas espectrais do *ponto 28*

Tabela 8 – Impacto da suavização sobre as medidas do *ponto 28*

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	577	699	-0,04634	0,059723
Filtro média 3	570	698	-0,00941	0,029264
Filtro média 4	570	697	-0,01379	0,016491
Filtro média 5	569	700	-0,00704	-0,01561
Filtro média 7	571	699	-0,00836	-0,00299
Filtro média 9	570	700	-0,01118	-0,03565
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>572</b>	<b>700</b>	<b>-0,005</b>	<b>0</b>

Na Figura 25 e na Tabela 8 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 577 nm e um pico de absorção em 699 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de transformada de Fourier (Figura 26). Analisando-se os valores máximo e mínimo, a partir do módulo da primeira derivada verificou-se que houve uma diminuição no valor máximo e um aumento no mínimo. Os demais filtros



também reduziram o ruído aleatório, principalmente a transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.

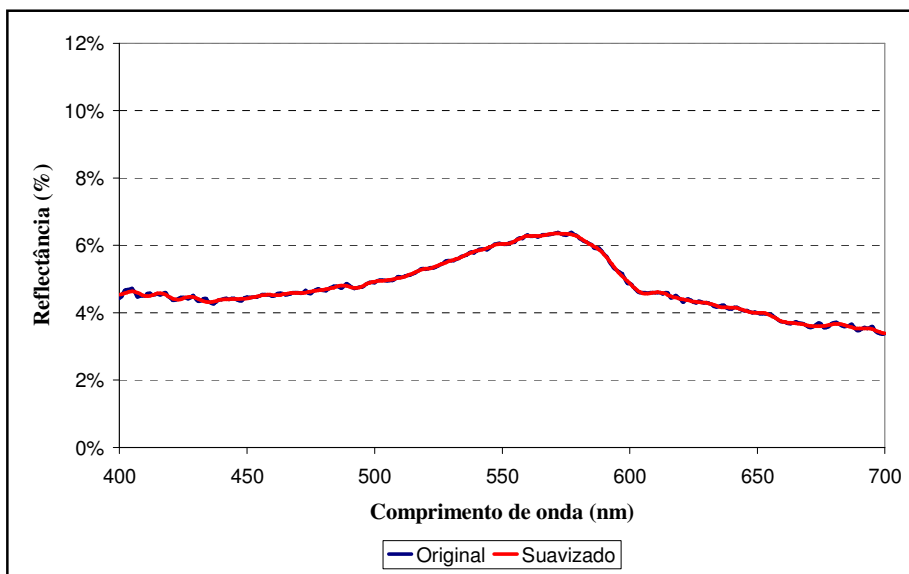


Figura 26 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do *ponto 28*

A Figura 27 apresenta o conjunto das curvas espectrais suavizadas para os 35 pontos amostrais.

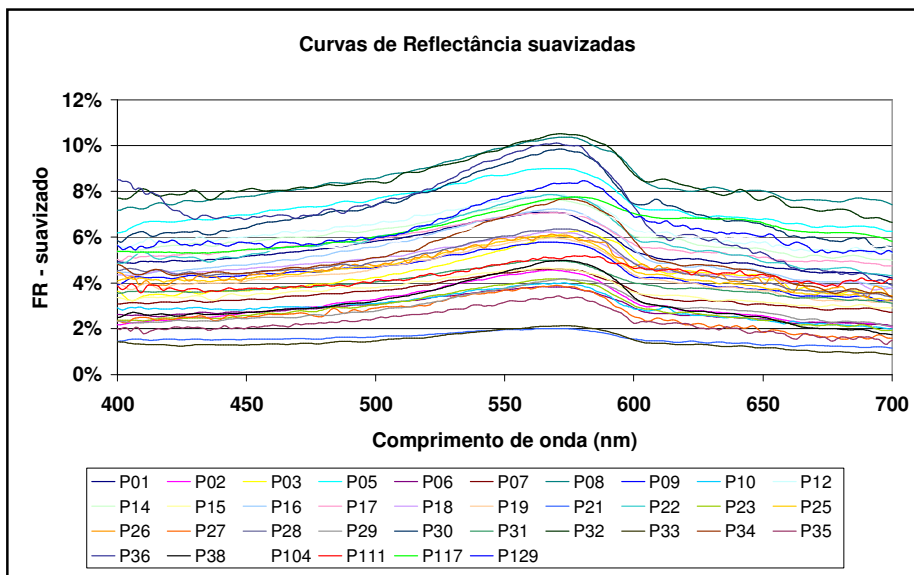


Figura 27 - Curvas Espectrais suavizadas para as 35 amostras de campo

Observa-se, na Figura 27, que o pico de reflectância máximo ocorrido na maioria das curvas encontra-se entre 560 e 570 nm, que, segundo Kirk (1994), Rundquist et al. (1996) e Barbosa (2005), corresponde a uma região com presença de clorofila algal. A região de absorção verificada entre 580 e 700 nm, representa, segundo os autores, as regiões de absorção clássica de clorofila algal (676 nm) e absorção no infravermelho próximo.

Nas análises de clorofila algal realizadas por Rundquist et al. (1996) em laboratório, foram observadas algumas exceções nas concentrações de clorofila entre 340 e 740 nm, que, segundo os autores, podem ter sido causadas por ondulações sobre a superfície da água devido a uma ligeira brisa durante o experimento. Comparando com os dados obtidos em campo nesta pesquisa, pode-se concluir que aqui também deve ter ocorrido influência das ondulações na superfície da água, devido ao vento, para as concentrações de clorofila, embora essa variável não esteja disponível para análise

As curvas suavizadas foram separadas em quatro conjuntos, conforme as condições de tempo discutidas anteriormente. Análises comparativas relacionando a influência das condições de tempo nas medidas de reflectância da água no reservatório de Itupararanga e as variáveis limnológicas observadas em campo foram realizadas e são discutidas a seguir.

### **6.2.2 Análise Exploratória da influência das condições do tempo nas medidas espectrais da água**

As curvas de reflectância suavizadas dos 3 pontos pertencentes ao conjunto 1 (céu aberto e vento fraco) são apresentadas na Figura 28. Os parâmetros limnológicos avaliados para esse conjunto podem ser observados na Tabela 9.



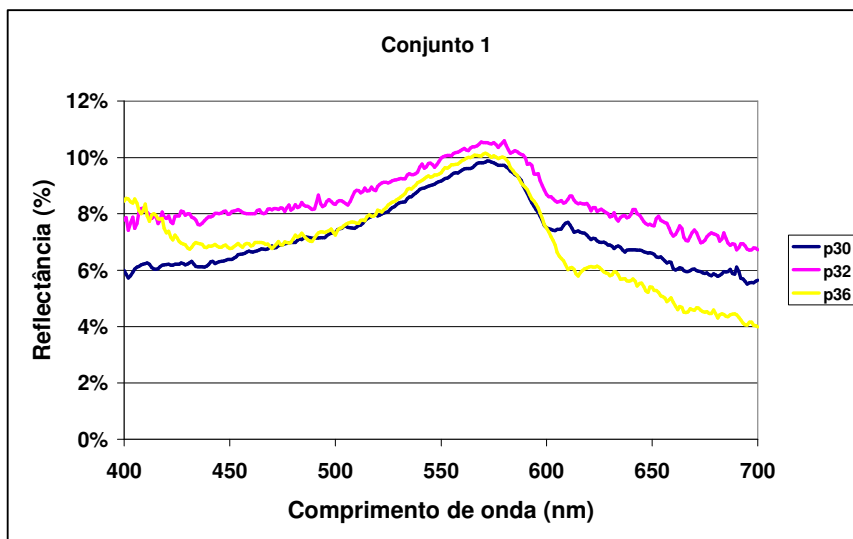


Figura 28 - Reflectância dos pontos referentes ao conjunto 1

Tabela 9 - Parâmetros limnológicos referentes ao conjunto 1

Pontos	Condições céu	TSS (mg/l)	Turbidez (NTU)	Secchi (m)	Cond. Elétrica ( $\mu\text{S/cm}$ )	Vento	Ondas	Hora
<b>P30</b>	Sol	0,240	1,31	2,50	82,50	Fraco	pequenas	14:51
<b>P32</b>	Sol	0,135	1,97	2	82,40	Fraco	Pequenas	15:02
<b>P36</b>	Sol	0,130	0,32	2,10	84,90	Fraco	pequenas	15:32

Observa-se na Figura 28 um pico de reflectância na faixa do verde, entre 560 e 570 nm, que, teoricamente, caracteriza a ocorrência e a presença de clorofila, de acordo com Kirk (1994), Rundquist et al. (1996), e Barbosa (2005). Esse pico de reflexão corresponde a cerca de 10% para os pontos estudados, considerado um valor alto, indicando a presença de fitoplâncton neste corpo d'água.

Analisando as curvas desses três pontos, observa-se a influência do efeito da reflexão especular do céu, que pode estar associado ao horário de coleta (entre 15:00 e 15:30 h para esses pontos), principalmente para o ponto 32 que encontra-se totalmente deslocado em relação aos demais com reflectância próxima de 11%. Segundo Esteves (1998), a posição do sol durante o dia, além da latitude e as estações do ano, influencia na reflexão da radiação na



superfície da água. Isso pode justificar a alteração da curva correspondente ao ponto 32 (horário de coleta: 15:02 h), em relação aos demais pontos desse conjunto.

Com relação às variáveis limnológicas, observa-se na Tabela 9 que, de um modo geral, ocorre uma homogeneidade nos valores, o que dificulta a identificação de alguma influência justificável de tais variáveis no comportamento das curvas.

Os espectros obtidos para o segundo agrupamento de dados pesquisado (conjunto 2) são apresentados na Figura 29, e as variáveis limnológicas na Tabela 10.

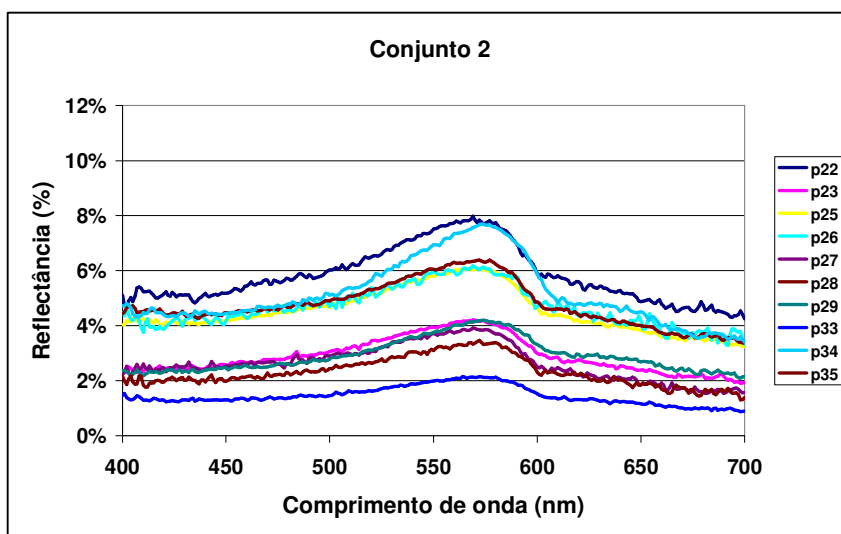


Figura 29 – Reflectância dos pontos referentes ao conjunto 2

Tabela 10 - Parâmetros limnológicos referentes ao conjunto 2

Pontos	Condições céu	TSS (mg/L)	Turbidez (NTU)	Secchi (m)	Cond. Elétrica ( $\mu\text{S/cm}$ )	Vento	Ondas	Hora
P22	Sol	0,170	0,57	2,20	84,50	médio	pequenas	14:15
P23	Sol	0,275	1,02	2,30	84,40	médio	pequenas	14:26
P25	sol	0,165	0,43	2,60	83,80	médio	médias	14:34
P26	Sol	0,230	0,31	2,80	84,10	médio	pequenas	14:47
P27	Sol	0,090	0,57	2,60	84,20	médio	pequenas	14:03
P28	Sol	0,385	0,97	2,20	83,30	médio	pequenas	14:40
P29	Sol	0,680	0,90	1,90	81	médio	pequenas	16:06
P33	Sol	0,070	1,31	2,60	82,10	médio	pequenas	15:59
P34	Sol	0,460	0,46	2,10	83,40	médio	pequenas	15:19
P35	Sol	0,135	1,07	2,40	83,90	médio	pequenas	15:25



Analisando a Figura 29 pode-se observar que os pontos amostrais desse conjunto não apresentam reflectância significativa na faixa do azul, provavelmente devido à presença de vento, que tende a reduzir a transmissão da luz na interface ar/água, devido à influência da reflexão especular da radiação eletromagnética. Com isso, o campo de luz submerso fica bem menor.

Observa-se uma diminuição do albedo em relação ao conjunto 1, com a maioria das curvas com valores de reflectância entre 0 e 4%, e com um pico de reflectância próximo a 8% na faixa do verde (570 nm), o qual pode estar associado à presença de clorofila (KIRK, 1994; RUNDQUIST et al., 1996; BARBOSA, 2005).

Pode-se inferir que, embora a geometria de aquisição de tomada dos dados tenha sido orientada para reduzir a componente especular da água, o sinal de superfície foi bem menor do que seria em condições de superfície da água plana, ou seja, sem vento.

Assim como verificado para o conjunto 1, as variáveis limnológicas encontram-se bastante homogêneas, não influenciando nas respostas espectrais das curvas estudadas para esse conjunto de dados, conforme observado na Tabela 10.

As curvas de reflectância dos pontos pertencentes ao conjunto 3 (céu nublado e vento fraco) são apresentadas na Figura 30 e os parâmetros limnológicos observados em campo são apresentados na Tabela 11.

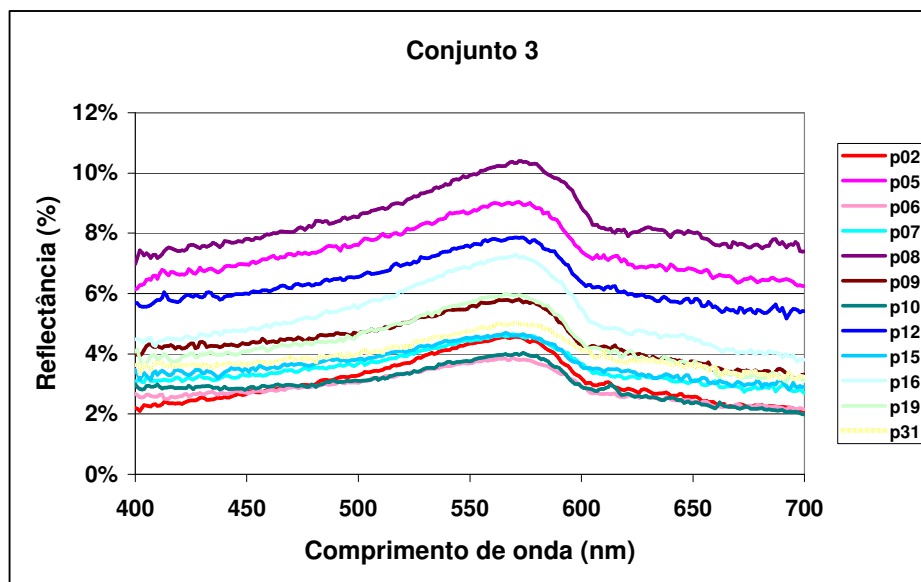


Figura 30 - Reflectância dos pontos referentes ao conjunto 3

Tabela 11 - Parâmetros limnológicos referentes ao conjunto 3

<b>Pontos</b>	<b>Condições Céu</b>	<b>TSS (mg/L)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Secchi (m)</b>	<b>Cond. Elétrica (µS/cm)</b>	<b>Vento</b>	<b>Ondas</b>	<b>Hora</b>
<b>P2</b>	nublado	0,105	0,36	2,60	84,80	Fraco	pequenas	12:15
<b>P5</b>	Nublado Sem sol	0,172	0,39	2,60	84,60	Fraco	pequenas	12:09
<b>P6</b>	Nublado Com sol	0,195	1,06	2,60	84,10	Fraco	pequenas	12:24
<b>P7</b>	Nublado Sem sol	0,155	0,30	2,80	85,10	Fraco	pequenas	11:32
<b>P8</b>	Nublado Sem sol	0,130	0,21	2,70	84,20	Fraco	pequenas	11:40
<b>P9</b>	nublado	0,185	0,95	2,40	84,40	Fraco	pequenas	13:45
<b>P10</b>	Nublado Com sol	0,210	3,54	2,50	84,40	Fraco	Pequenas	13:55
<b>P12</b>	Nublado	0,065	0,43	2,40	84,80	Fraco	Médias	12:34
<b>P15</b>	nublado	0,170	0,29	2,40	84,60	Fraco	Pequenas	12:59
<b>P16</b>	nublado	0,210	0,98	2,20	85	Fraco	Pequenas	13:06
<b>P19</b>	Nublado com sol	0,170	0,55	2,20	84,10	Fraco	Pequenas	13:35
<b>P31</b>	Nublado Com sol	0,045	1,03	2	82,30	Fraco	Pequenas	15:12

Na Figura 30 observa-se um aumento no albedo, com as curvas espectrais dos pontos 5 e 8 apresentando reflectância em torno de 10%. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de ventos mais fracos do que os ocorridos para o conjunto 2. Os demais pontos apresentam um albedo mais baixo (entre 4% e 8%), porém ainda maiores do que os do conjunto 2, onde ocorreu vento de médio a forte.

O pico de reflectância na faixa do verde, em 570 nm, correspondente à presença de clorofila (KIRK, 1994; RUNDQUIST et al., 1996; BARBOSA, 2005).

Na Tabela 11 observa-se que as variáveis limnológicas apresentam valores muito próximos entre si, como verificado para os demais conjuntos analisados. Isso descarta a possibilidade de influência dessas variáveis no comportamento das curvas espectrais estudadas.



A Figura 31 apresenta as curvas espectrais para o conjunto 4 (céu nublado e vento de médio a forte) e na Tabela 12 encontram-se as variáveis limnológicas para os pontos referentes a esse conjunto.

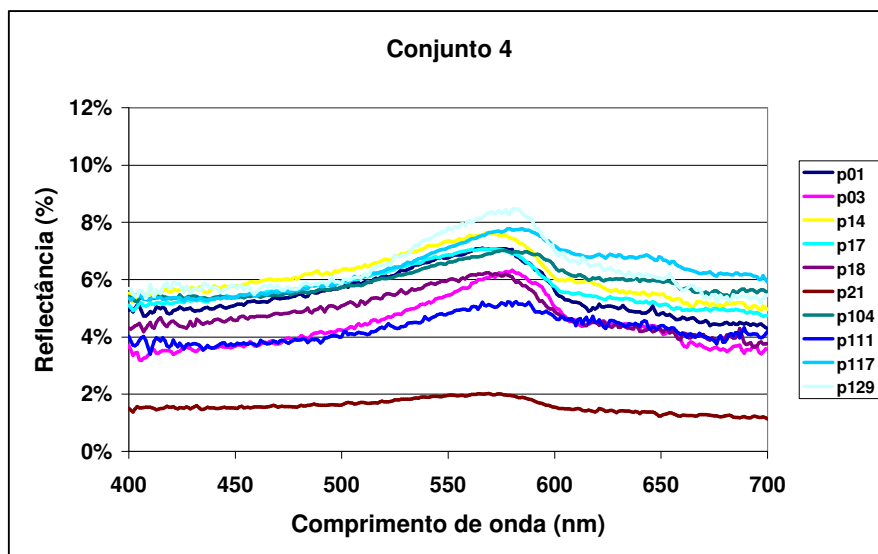


Figura 31 - Reflectância dos pontos referentes ao conjunto 4

Tabela 12 - Parâmetros limnológicos referentes ao conjunto 4

Pontos	Condições Céu	TSS (mg/L)	Turbidez (NTU)	Secchi (m)	Cond. Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Vento	Ondas	Hora
<b>P1</b>	Nublado Sem sol	0,160	0,86	3	85	Forte	Média/alta	10:58
<b>P3</b>	Nublado Sem sol	0,235	0,77	2,70	84,90	forte	Média/alta	11:22
<b>P14</b>	Nublado	0,295	1,04	2,50	84,30	médio	Médias	12:51
<b>P17</b>	nublado	0,035	1,22	2,50	85,20	médio	Médias	11:58
<b>P18</b>	nublado	0,075	0,39	2,90	84,40	forte	Médias/alta	11:49
<b>P21</b>	Nublado com sol	0,160	1,26	2,40	84,20	forte	Média/alta	14:10
<b>P104</b>	Nublado Sem sol	0,200	1,94	1,70	75,80	forte	Média/alta	13:13
<b>P111</b>	Nublado Sem sol	0,220	3,81	1,40	75,50	forte	Média/alta	12:35
<b>P117</b>	Nublado Sem sol	0,260	2,43	1	67,70	Forte	Médias/alta	12:06
<b>P129</b>	Nublado Sem sol	0,125	3,55	1,20	76,10	forte	Média/alta	11:19



Na Figura 31 verifica-se que, de um modo geral, os albedos das curvas são baixos e concentrados entre 5% e 8%. Esses pontos foram tomados sob condições de iluminação precária (nuvens) e vento de médio a forte, diminuindo o sinal da reflectância de superfície, ou seja, diminuindo o albedo. Com exceção do ponto 21 (aproximadamente 2% de reflectância) as demais curvas apresentam-se bastante homogêneas.

O pico de reflectância entre 560 e 570 nm, que corresponde à clorofila, é também observado nesse conjunto (RUNDQUIST et al., 1996; KIRK, 1994, BARBOSA, 2005).

A Tabela 12 mostra que as variáveis limnológicas definem valores muito parecidos entre si, com algumas exceções, como por exemplo o ponto P117, que apresentou a menor Profundidade de Secchi (1 m) e a menor condutividade elétrica (67,70  $\mu\text{S/cm}$ ) entre todos os pontos do conjunto e o ponto P1 que apresentou os maiores valores de Profundidade de Secchi (3 m) e de condutividade elétrica (85  $\mu\text{S/cm}$ ) do conjunto. Apesar disso, não é possível relacionar tais variáveis com as características das curvas espectralmente medidas.

### 6.2.3 Razão e Diferença de bandas

As técnicas de razão e diferença de bandas foram aplicadas às curvas espectrais suavizadas, a partir da definição de alguns intervalos espectrais que melhor caracterizaram os componentes do corpo d'água pesquisado. Para tanto, foram calculadas a média da reflectância mínima e a média da reflectância máxima, aplicando a primeira derivada em todos os espectros suavizados, separados nos quatro conjuntos em que a amostra foi dividida (Figura 32).

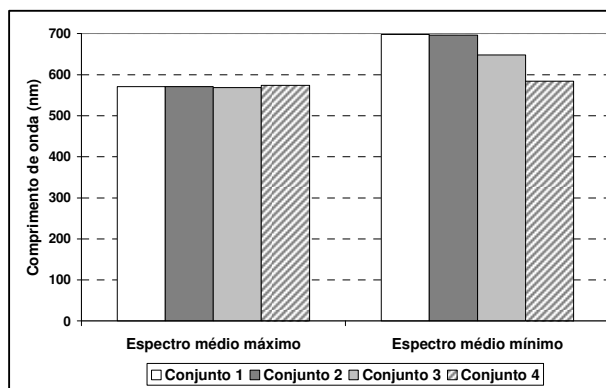


Figura 32 – Espectros médios máximos e mínimos para cada um dos quatro conjuntos, calculados a partir da aplicação da primeira derivada

Os intervalos espectrais resultantes para cada conjunto analisado foram: 571 a 698 nm para o conjunto 1; 571 a 696 nm para o conjunto 2; 568 a 648 nm para o conjunto 3 e 574 a 584 nm para o conjunto 4.

Técnicas de razão (571/698, 571/696, 568/648, 574/584) e diferença (571-698, 571-696, 568-648, 574-584) de bandas foram aplicadas às reflectâncias, utilizando todos os intervalos para cada um dos quatro conjuntos. Devido a baixa concentração das variáveis no reservatório, optou-se por normalizar tanto as variáveis limnológicas quanto os intervalos de comprimento de onda, para as operações de razão e diferença de bandas, aplicando uma função logarítmica.

#### 6.2.4 Remoção do Contínuo

O método de Remoção do contínuo espectral foi aplicado às curvas espectrais dos 35 pontos amostrais tomados “in situ”, separados nos quatro conjuntos amostrais, conforme descrito no item 6.2. As feições de absorção adotadas para a aplicação da remoção do contínuo foram aquelas mais evidentes, observadas para os espectros suavizados, correspondentes aos intervalos de comprimentos de onda: de 580 a 683 nm, para os conjuntos 1 e 2; de 580 a 628 nm para o conjunto 3 e de 580 a 639 nm para o conjunto 4 (Tabela 13). As curvas espectrais com o contínuo removido são apresentadas na Figura 33.

Tabela 13 – Intervalos definidos para as feições de absorção para cada conjunto de dados e Comprimento de onda ( $\lambda$ ) central de cada banda

Amostra	Central $\lambda$ (nm)	Limite inferior $\lambda$ (nm)	Limite superior $\lambda$ (nm)
Conjunto 1	606,33	580	683
Conjunto 2	609,4	580	683
Conjunto 3	603,08	580	628
Conjunto 4	608,8	580	639



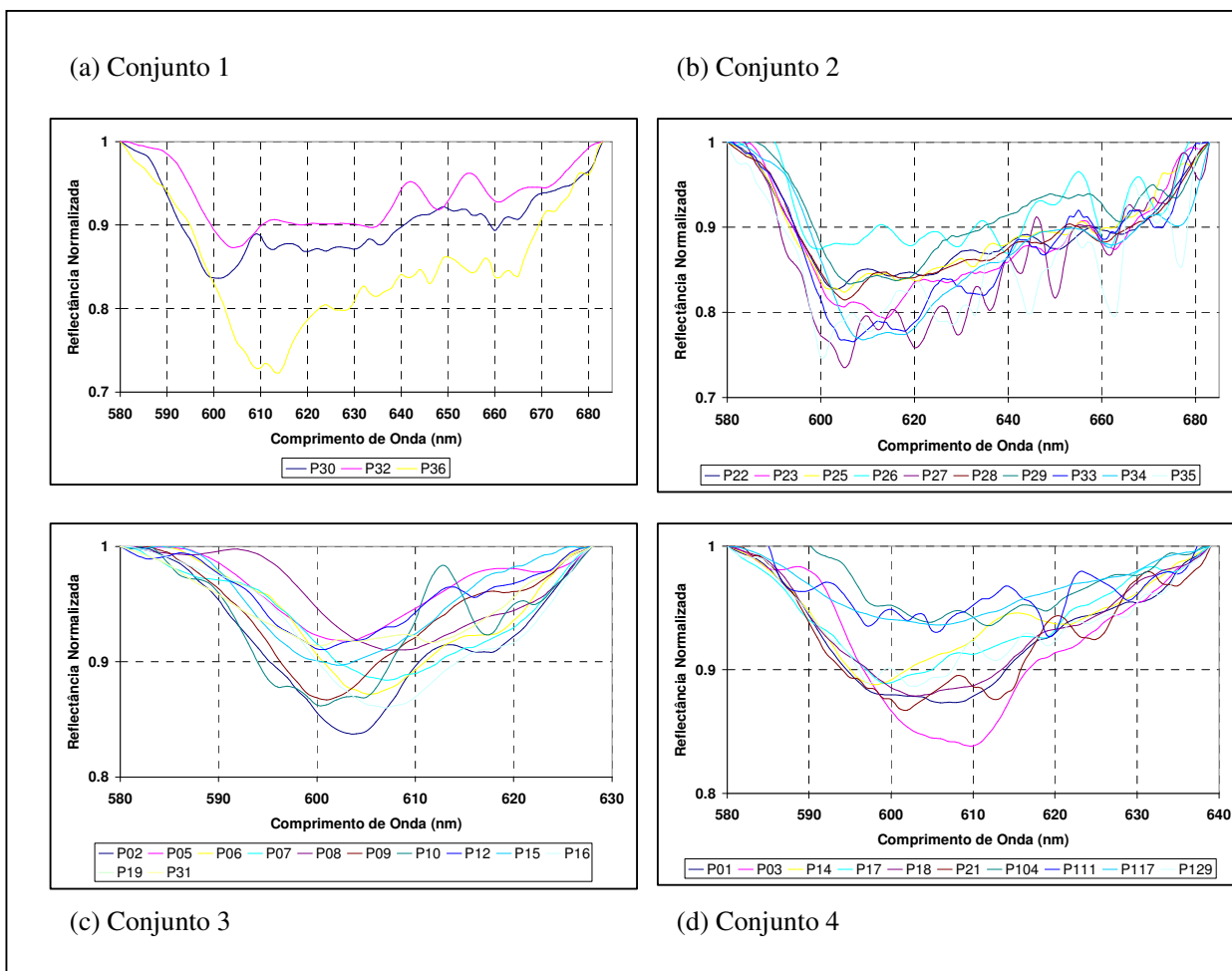


Figura 33 - Espectros do Contínuo removido para os quatro conjuntos da amostra (a) Conjunto 1,  $n = 3$ ; (b) Conjunto 2,  $n = 10$ ; (c) Conjunto 3,  $n = 12$ ; (d) Conjunto 4,  $n = 10$

Observa-se na Figura 33 que não há um padrão no comportamento dos pontos para os conjuntos analisados. É provável que os ruídos estejam se destacando, embora as curvas tenham sido suavizadas, o que leva a crer que a variabilidade nos espectros pode estar relacionada à influência da iluminação e vento, conforme discutido no item 6.2.2. A Tabela 14 apresenta os parâmetros das bandas de absorção do contínuo removido para cada um dos conjuntos.

Tabela 14 – Parâmetros das bandas de absorção do contínuo removido para cada conjunto

		Conjunto 1: Feição entre 580 – 683 nm		Conjunto 2: Feição entre 580 – 683 nm	
Parâmetros		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>Posição central (<math>\lambda_{nm}</math>)</b>		606,33		609,4	
<b>Profundidade</b>		0,189	0,077	0,202	0,043
<b>Largura</b>		57,666	13,316	58,8	12,813
<b>Assimetria</b>		0,289	0,154	0,247	0,104
<b>Área</b>		11,507	6,939	11,747	2,722
		Conjunto 3: Feição entre 580 – 628 nm		Conjunto 4: Feição entre 580 – 639 nm	
Parâmetros		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
<b>Posição central (<math>\lambda_{nm}</math>)</b>		603,08		608,8	
<b>Profundidade</b>		0,112	0,027	0,107	0,031
<b>Largura</b>		23,333	0,013	29,7	3,400
<b>Assimetria</b>		0,703	0,132	0,918	0,636
<b>Área</b>		2,626	0,814	3,209	1,013

Observa-se na Tabela 14 que, de um modo geral, para os quatro conjuntos de pontos analisados, verifica-se que ocorre variabilidade no parâmetro profundidade de banda. No conjunto 1, o ponto 36 foi o que se destacou, apresentando a maior profundidade de banda dentre todos os pontos do conjunto (Figura 33-a). Verifica-se que esse ponto apresentou também o maior valor de condutividade elétrica (Tabela 9), o que pode estar relacionada a maior concentração de clorofila na água (ROCHA, 2003; BREUNIG et al, 2007; RUNDQUIST et al, 1996). O ponto que apresentou menor absorção para o conjunto 1 foi o P32, cujos valores das variáveis limnológicas encontram-se dentro da média do conjunto.

O conjunto 2 (Figura 33-b) apresenta um número de pontos maior (10), embora todas as curvas estejam visivelmente sob influencia de ruídos. Assim, o conjunto apresenta a melhor profundidade de banda dentre todos os conjuntos analisados (Tabela 14), sendo os pontos P27 e P35 aqueles que apresentaram maior absorção. O P26 foi o que apresentou menor absorção dentre todos do conjunto. Verifica-se, na Tabela 10, que os valores das variáveis limnológicas para esses pontos encontram-se dentro da média para o conjunto.



Com exceção do P10, o conjunto 3 apresentou a melhor distribuição de curvas dentre todos os conjuntos analisados (Figura 33-c). A maior absorção ocorreu para P02 e a menor em P05. Os pontos P10 e P02 apresentaram um comportamento diferenciado do restante das curvas no comprimento de onda de 613 nm, provavelmente devido a ruídos. Na Tabela 11 observa-se que o P10 apresentou o maior valor de Turbidez do conjunto (3,54 NTU), sendo que os demais pontos concentram os valores das variáveis limnológicas dentro da média do conjunto.

Na Figura 33 (d), observa-se que o conjunto 4 apresentou quatro pontos com influência de ruídos, que são: P21, P104, P111 e P129, o que pode ser explicado pela influência da iluminação e ventos fortes (Tabela 12). A curva com maior absorção foi a do ponto P03 e a de menor absorção a do ponto P104. A Tabela 12 mostra que esses pontos apresentam valores das variáveis limnológicas na média do conjunto.

### **6.3 Tratamento e Análise das Imagens Multiespectrais**

As imagens geradas pelo satélite Ikonos II são passíveis de serem programadas para o período desejado pelo usuário, porém não é possível a definição específica do(s) dia(s), devido a verificação automática de porcentagem de nuvens realizada por sensor, sendo as imagens fornecidas aquelas de melhor qualidade para o período especificado. Além disso, o planejamento para a coleta de dados “in situ” no presente trabalho foi tarefa complicada, pois envolveu a sincronia de três grupos de pesquisadores na equipe de campo, de modo a viabilizar a aquisição simultânea de diferentes tipos de medidas. A equipe foi assim composta: dois pesquisadores da FCA-Unesp, Botucatu, que auxiliaram na coleta de dados limnológicos e navegação da lancha; um pesquisador do INPE, que coletou os dados espectrorradiométricos; a pesquisadora desta tese e sua orientadora, ambas da FCT-Unesp, Presidente Prudente, que definiram a seqüência da tomada dos pontos no reservatório, coletaram os pontos GPS de navegação e de precisão, anotaram as condições climáticas, e se interagiram sobre a situação de coleta.

Embora se tenha conhecimento que a data e mês do levantamento devam ser definidas considerando-se as condições meteorológicas regionais e o período adequado referente ao nível da água (seca, cheia, enchente e vazante) evitando-se assim a ocorrência de chuvas, o que inviabilizaria a coleta de dados espectrais no corpo d'água e nuvens,



prejudicando a análise da imagem, o principal fator que contribuiu para a definição da data e mês nesta pesquisa foi a possibilidade da participação de todos os integrantes da equipe de campo e disponibilidade dos equipamentos necessários. Devido às condições anteriores, o levantamento “in situ” teve que ser realizado no mês de fevereiro. Ainda assim, foram feitas pesquisas em bancos de dados meteorológicos na Internet, Cetesb, Comitê de Bacia Hidrográfica, entre outros, para especificar a melhor data para ida a campo. A partir daí, definiu-se a semana de 05 a 09 de fevereiro como a mais indicada para a coleta em campo e a programação da aquisição da imagem. Diante do exposto, a imagem tomada pelo satélite Ikonos II e disponibilizada para a pesquisa foi a do dia 05 de fevereiro, enquanto o trabalho de campo ocorreu nos dias 07 e 08 de fevereiro, portanto, defasado em 2 e 3 dias da aquisição da cena.

Como a imagem adquirida em 05 de fevereiro apresentou alta cobertura de nuvens (Figura 34), inclusive sobre parte considerável do reservatório, foi solicitada à empresa responsável pelas imagens Ikonos no Brasil (Engesat) a possibilidade de disponibilizar uma nova imagem, sem cobertura de nuvens, a qual tivesse sido adquirida em data próxima. Uma nova imagem com as características solicitadas foi utilizada na pesquisa, porém defasada em 49 dias do levantamento de campo (Figura 35). Embora haja uma diferença grande em termos de características dos componentes da água, tornou-se um desafio pesquisar o comportamento das correlações observadas entre os dois períodos estudados.



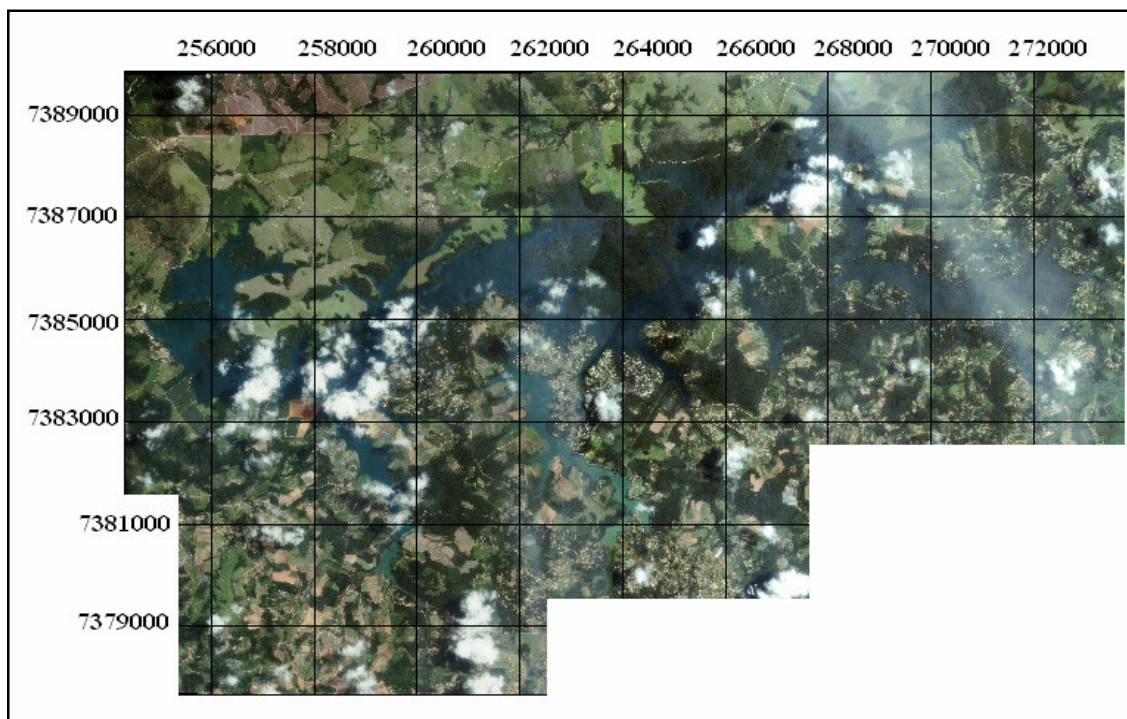


Figura 34 - Imagem Ikonos II - fevereiro de 2007

Composição colorida: B1 (azul), B2 (verde) e B3 (vermelho)

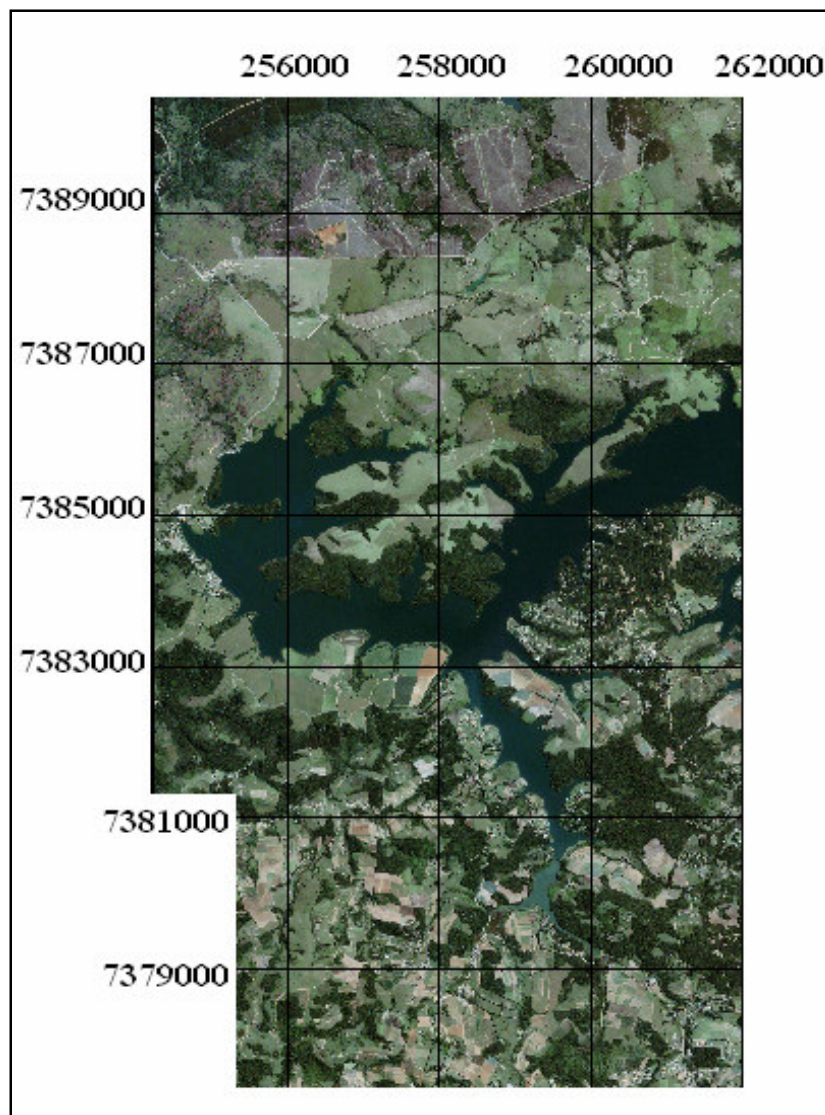


Figura 35 - Imagem Ikonos II - março de 2007  
Composição colorida: B1 (azul), B2 (verde) e B3 (vermelho)

As imagens multiespectrais do Ikonos II foram submetidas a tratamentos a fim de torná-las espacial e radiometricamente compatíveis com os dados espectrais e limnológicos tomados “in situ”. Tais tratamentos foram: georreferenciamento das cenas, máscara de recorte do corpo d’água e correções radiométrica e atmosférica. Técnicas de razão e diferença de bandas foram aplicadas às imagens multiespectrais, após a extração dos valores de reflectância aparente nos pontos amostrados “in situ”, dentro do corpo d’água.

### 6.3.1 Georreferenciamento das cenas

O georreferenciamento das cenas do Ikonos II fez-se necessário, para refinar a qualidade geométrica das imagens, embora as mesmas sejam fornecidas aos usuários com correção geométrica de sistema. Esta é uma prática comum quando se trabalha com Sistemas de Informações Geográficas – SIG, visto que quanto mais preciso o ajuste entre as imagens e todos os dados contidos no banco de dados, resultados mais confiáveis quanto a localização geográfica serão obtidos das análises realizadas com os mesmos. Esta etapa foi realizada no aplicativo Spring, cujo georreferenciamento usa uma transformação geométrica simples para relacionar coordenadas de imagem (linha, coluna) com coordenadas de um sistema de referência (sistema de coordenadas da projeção cartográfica utilizada). A transformação utilizada no Spring para o georreferenciamento das imagens Ikonos de fevereiro e março de 2007 foi a Transformação Afim no plano. Antes do georreferenciamento as imagens Ikonos de fevereiro e março de 2007 foram transformadas do formato original de 11 bits para 8 bits, no aplicativo Spring.

O sistema de projeção utilizado no banco de dados gerado foi o *Universal Transverse of Mercator* – UTM, e o modelo da terra foi o *World Geodetic System* - WGS-84, zona 23°. Para a imagem de fevereiro foram definidos 12 pontos de controle para o georreferenciamento, sendo 6 deles obtidos através da imagem Ikonos de abril de 2001, tomada como referência e os outros 6 disponibilizados com coordenadas geográficas (latitude e longitude), obtidos em trabalho de campo com equipamentos GPS de precisão 4600 e Hyper na área de estudo. O georreferenciamento foi feito então via tela (imagem-imagem), sendo refinado com os pontos de controle obtidos em campo, via teclado (coordenadas latitude e longitude), e o resíduo avaliado em unidades de pixel, foi igual a 1, considerado aceitável para o trabalho. Para a imagem de março foram usados 6 pontos de controle em relação à imagem Ikonos de abril de 2001 e 3 pontos de controle adquiridos em campo, conforme já descrito. A precisão final obtida foi de 0,8 pixel, considerado aceitável para o trabalho.

### 6.3.2 Exclusão da área externa ao corpo d'água

Para isolar o corpo d'água uma máscara de recorte foi obtida através da segmentação da banda 4 (imagem Ikonos de fevereiro) no programa Spring. A delimitação do



reservatório foi feita a partir de uma segmentação por crescimento de regiões usando parâmetros de similaridade igual a 20 e área igual a 200 pixels. Em seguida foi aplicada a técnica de classificação não-supervisionada, disponível no Spring, denominada Iseseg para agrupar as regiões definidas na segmentação, com valor de limiar igual a 90%. O mapeamento das classes temáticas foi realizado e a edição manual do contorno. A máscara gerada foi utilizada para o recorte dos Planos de Informação referentes às quatro bandas da imagem de fevereiro. Essa mesma máscara foi utilizada também para delimitar a região oeste do reservatório, referente a área onde se encontram disponíveis os 20 pontos de coleta de dados espectrais e limnológicos “in situ”, livre da presença de nuvens. Isso se deu a partir do mosaico do Plano de Informação e edição manual do mesmo. A partir daí foi feito o recorte de todos os Planos de Informação referentes às quatro bandas da imagem de fevereiro e às quatro bandas da imagem de março.

A Figura 36 apresenta o recorte do corpo d’água para a área total do reservatório e os pontos de observação dos dados em campo.

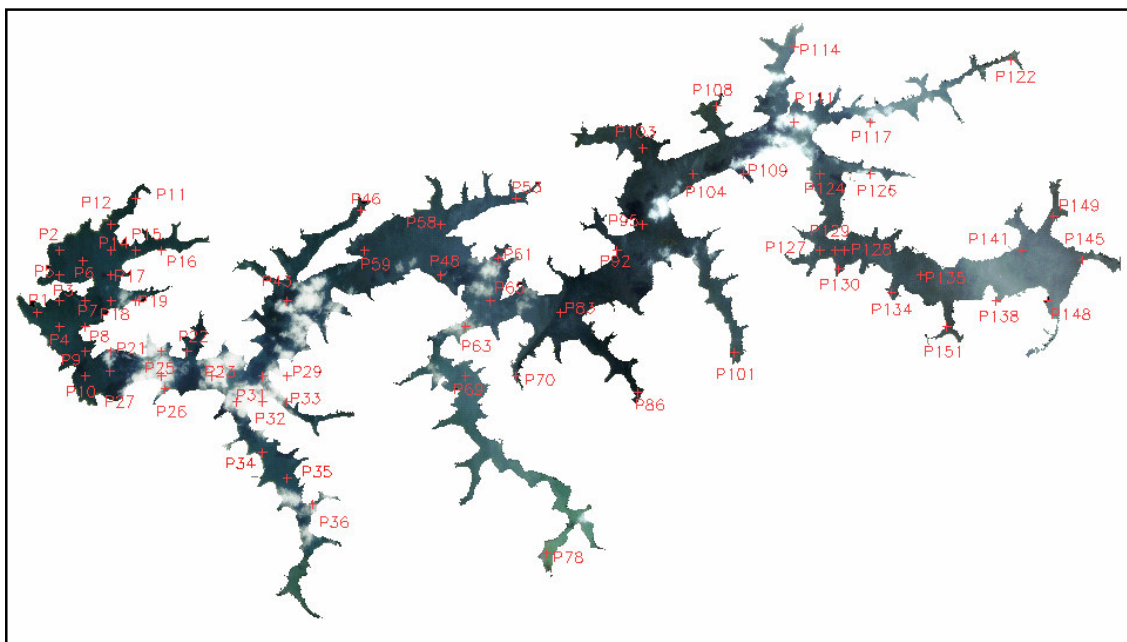


Figura 36 – Recorte do corpo d’água após aplicação da máscara, para o reservatório de Itupararanga/SP, com os pontos amostrais.

Composição colorida: B1 (azul), B2 (verde) e B3 (vermelho)

Na Figura 37 observa-se o recorte do corpo d'água para a região oeste do reservatório de Itupararanga com os 20 pontos amostrais definidos e posicionados em campo. Para esses pontos (com exceção dos pontos 4, 11, 43, 46, 48, 58 e 59), há medidas limnológicas e espectrais. Pode-se observar que destes aproximadamente 20 apresentam condições de leitura, ou seja, encontram-se em região sem cobertura de nuvens. Portanto, esses últimos foram usados nas análises de correlação e regressão entre os dados tomados “in situ” e a imagem multiespectral.

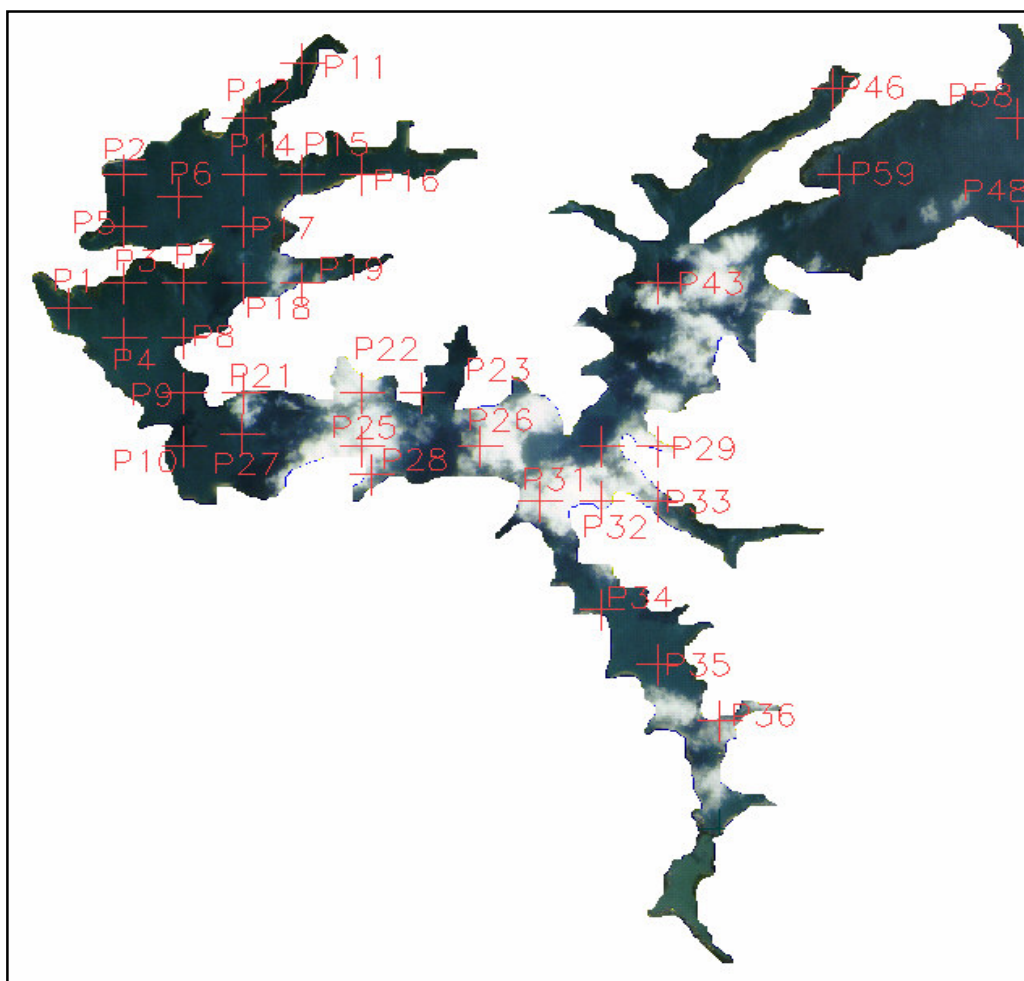


Figura 37 - Recorte do corpo d'água, após aplicação da máscara, referente à parte oeste do reservatório de Itupararanga/SP, com os pontos amostrais.  
Composição colorida: B1 (azul), B2 (verde) e B3 (vermelho)

### 6.3.3 Correções Radiométrica e Atmosférica

A correção radiométrica realizada nas imagens Ikonos de fevereiro e março de 2007 foram realizadas com o objetivo de converter os ND's (números digitais) ou valores de brilho das imagens originais em radiância espectral, minimizando os efeitos instrumentais que o sinal sofre no percurso sensor-alvo-sensor. Para tanto, a radiância espectral ou radiância no sensor foi calculada a partir da equação (7) apresentada a seguir, de acordo com Soudani et al. (2006).

$$L_{sat}^i = \frac{ND^i}{G^i} \quad (7)$$

onde:  $G^i$  = fator de calibração para a banda  $i$  em (mW / cm<sup>2</sup> sr μm);

$L_{sat}^i$  = radiância aparente ou radiância espectral em (mW / cm<sup>2</sup> sr μm);

$ND^i$  = Número Digital ou valor de brilho

O fator de calibração para as bandas do Ikonos foram obtidos em Soudani et al. (2006) e Goward et al. (2003) e correspondem a 6,33 mW / cm<sup>2</sup> sr μm para a banda 1; 6,49 mW / cm<sup>2</sup> sr μm para a banda 2; 8,4 mW / cm<sup>2</sup> sr μm para a banda 3 e 7,46 mW / cm<sup>2</sup> sr μm para a banda 4. A Tabela 15 apresenta os valores da radiância aparente para as imagens Ikonos de fevereiro e março.

Tabela 15 - Cálculo da radiância aparente para as imagens Ikonos

Bandas Ikonos	Fator de Calibração ou Ganho (G) para bandas do Ikonos (mW/cm <sup>2</sup> srμm)	Lmin(fev) (mW/cm <sup>2</sup> srμm)	Lmax(fev) (mW/cm <sup>2</sup> srμm)	Lmin(março) (mW/cm <sup>2</sup> srμm)	Lmax(março) (mW/cm <sup>2</sup> srμm)
B1	6,33	0	40,28	0	40,28
B2	6,49	0	38,98	0	39,29
B3	8,4	0	30,11	0	30,35
B4	7,46	0	33,91	0	34,18

Fonte: Adaptado de Soudani et al. (2006) e Goward et al. (2003)



A correção atmosférica, que objetiva a conversão dos ND's (números digitais) ou valores de brilho da imagem original em reflectância aparente, minimizando os efeitos atmosféricos que o sinal sofre no percurso sensor – alvo – sensor, foram realizadas baseando-se no método empírico de Chavez (1988), utilizando para isso o aplicativo Idrisi. O método de Chavez, denominado DOS (*Dark Object Subtraction*) é comumente aplicado na correção do efeito aditivo do espalhamento atmosférico, ou radiância de trajetória, em imagens multiespectrais, utilizando um alvo de reflectância teórica igual a zero, ou seja, regiões escuras ou de sombra. O modelo de correção radiométrica baseado em imagem, ou modelo DOS, também corrige o componente de espalhamento atmosférico aditivo atribuído à radiância de trajetória. Pressupõe-se que na imagem alguns pixels estão completamente na sombra e a radiância recebida pelo satélite é devida ao espalhamento atmosférico. Porém, sabendo-se que na superfície da Terra muitos poucos alvos são absolutamente pretos, supõe-se que uma porcentagem mínima de reflectância seja maior que 0% (CHAVEZ, 1996).

O modelo baseado no método DOS, disponível no aplicativo Idrisi, necessita de alguns dos parâmetros para sua aplicação. Esses parâmetros são mostrados na Figura 38, que exemplifica a aplicação do modelo para a banda 1 da imagem Ikonos de fevereiro de 2007.

The screenshot shows a dialog box for atmospheric correction. It is divided into two main sections: 'Atmospheric correction model' and 'Radiance calibration option'. In the 'Atmospheric correction model' section, 'Dark object subtraction' is selected with a radio button. Other options include 'Apparent reflectance model', 'Cos(t) model', and 'Full model'. The 'Radiance calibration option' section has 'Lmin/Lmax' selected. Below these are various input fields for parameters such as Year (2007), Month (02), Day (05), GMT (13.47), Wavelength of band center (0.4803), Dn haze (0), Optical thickness, Radiance at Dn 0 (Lmin) (0), Radiance at Dn max (Lmax) (40.28), Dn max (255), Satellite viewing angle (88.10750), Spectral solar irradiance (Eo) (213.80), Sun elevation (61.95890), and Spectral diffuse sky irradiance (0.0). At the bottom, there are fields for 'Input image' (b1\_fev) and 'Output image' (b1\_fev\_atmosd), along with 'OK', 'Close', and 'Help' buttons.

Figura 38 – Parâmetros necessários à aplicação do modelo de correção atmosférica baseado no método DOS do aplicativo Idrisi

Na Figura 38 observa-se que os parâmetros necessários à aplicação da correção atmosférica pelo método DOS no Idrisi, são: Ano, Dia, Mês e Hora (*GMT – Greenwich Mean Time*) pelo tempo médio de Greenwich, ângulo de visada do satélite, ângulo de elevação solar e o comprimento de onda central da banda que se está corrigindo, que são parâmetros disponibilizados no arquivo metadados da imagem (Tabela 16) e, este último no *site* da empresa Geoeeye (Tabela 17); e as radiâncias mínima e máxima, além do valor de brilho máximo para a banda, que são parâmetros calculados a partir da equação (7), conforme apresentado na Tabela 15. O valor de *Dn haze* (número digital do pixel mais escuro) foi obtido a partir da observação do histograma de frequências para a banda original que estava sendo corrigida. Estipulou-se que o valor de *Dn haze* seria aquele do ND anterior à frequência de mudança mais abrupta observada nos histogramas. Foram verificadas ocorrências de pixels com valores de brilho ou frequências já nos DN = 1 para todas as bandas das duas imagens Ikonos. Portanto, o valor de *Dn haze* adotado foi zero. Portanto, essa correção tornou as duas imagens comparáveis, porém com valor resultante igual à reflectância aparente.

A Tabela 16 apresenta os parâmetros necessários à aplicação do método DOS no aplicativo Idrisi e a Tabela 17 o comprimento de onda do centro de banda para as imagens Ikonos.

Tabela 16 - Metadados das Imagens Multiespectrais Ikonos

<b>Imagem</b>	<b>Dia</b>	<b>Mês</b>	<b>GMT (Greenwich Mean Time) (horas)</b>	<b>Ângulo de visada do satélite (graus)</b>	<b>Ângulo de elevação solar do satélite (graus)</b>
Ikonos fevereiro de 2007	05	02	13,47	88,10750	61,95890
Ikonos março de 2007	24	03	13,67	65,02294	55,81880

Fonte: Geoeeye (2008)

Tabela 17 - Características da banda espectral Ikonos

<b>Bandas</b>	<b>Comprimento de onda do centro de banda (nm)</b>
B1	480.3
B2	550.7
B3	664.8
B4	805.0

Fonte: Geoeeye (2008)



### 6.3.4 Extração dos valores de reflectância aparente

As imagens resultantes do georreferenciamento e da correção radiométrica e atmosférica foram submetidas a uma suavização a partir da aplicação de filtros de média móvel simples, a fim de reduzir a possível presença de ruídos e oscilações radiométricas (TSAI & PHILPOT, 1998). Esse processamento foi realizado também no Idrisi, tendo sido testadas janelas de 3x3 e 7x7 pixels. Após análises de correlação realizadas sobre os valores de reflectância obtidos para as duas janelas, observou-se que os resultados de correlação com valores mais altos (maiores que 0,6) ao nível de significância de 5% se deram para o filtro de janela 3x3 pixels. Portanto, as análises serão apresentadas somente para este filtro.

As imagens suavizadas com filtro de média 3x3 para fevereiro e março foram exportadas para o *software* Envi, e dois arquivos ASCII, um contendo os pontos de coleta em campo para toda a área do reservatório sem cobertura de nuvens (57 pontos) e outro contendo somente os pontos para a região oeste do reservatório (29 pontos), foram gerados e sobrepostos às respectivas máscaras das imagens no Envi. Nove pontos adicionais, que se encontram na região oeste do reservatório, foram lidos nas imagens de fevereiro e março, embora eles não contenham informações dos espectros de campo, apresentam informações limnológicas e espectrais das imagens.

A extração dos valores de reflectância aparente correspondentes aos pontos de interesse para cada máscara das imagens de fevereiro e março é apresentada no Apêndice C. Os pontos destacados em *itálico* nas Tabelas 1 e 2 do Apêndice C foram utilizados na construção dos modelos de regressão ( $n = 21$  e  $n = 16$ , respectivamente para as imagens de fevereiro e março), o que será apresentado e discutido no Capítulo 8. Os demais pontos apresentados nessas tabelas foram tomados como referência e utilizados para as inferências de TSS, Turbidez e Condutividade Elétrica ( $n = 36$  e  $n = 13$ , respectivamente). Vale observar que tais tabelas são apresentadas sem considerar a divisão da amostra em quatro conjuntos, o que será considerado posteriormente.

### 6.3.5 Razão de bandas

A técnica de razão de bandas foi aplicada aos valores de reflectância aparente extraídos das bandas das imagens Ikonos de fevereiro e março, nos pontos de



interesse (Apêndice C), a princípio, para os mesmos intervalos definidos nas análises dos dados espectrais (6.2.3), que foram: de 571 a 698 nm; de 571 a 696 nm; de 568 a 648 nm e de 574 a 584 nm, que estão relacionados com a presença de fitoplâncton, conforme Kirk (1994), Barbosa (2005) e Rundquist (1996). Esses intervalos correspondem aos valores de comprimento de onda de 506,4 nm a 595 nm para a banda 2 (verde) do Ikonos e de 631,9 nm a 697,7 nm para a banda 3 (vermelho) do Ikonos. Portanto, foram testadas algumas combinações dessas bandas: B3/B2; B2/B3; (B2-B3)/(B2+B3). Outras combinações também foram avaliadas, conforme indicado na bibliografia consultada (KIRK, 1994; HOGE et al., 1987; GITELSON, 1992) envolvendo as quatro bandas do Ikonos: (B2-B4)/(B2+B4); B4/B3; B3/B1; B4/B1; B3/B4; B1/B2; B1/B4. Análises de correlação entre as razões dessas bandas e as variáveis limnológicas disponíveis para a pesquisa são apresentadas no item 7.4.

## 7 ANÁLISES DE CORRELAÇÃO

### 7.1 Correlações entre as variáveis limnológicas e os valores resultantes de razão e diferença de bandas aplicadas aos dados espectrais

Para cada um dos quatro conjuntos de dados, separados conforme as condições do tempo (nebulosidade e ondulação na superfície da água), foi calculada a correlação linear de Pearson entre a reflectância da água e cada uma das variáveis limnológicas. Embora o conjunto 1 seja aquele que apresenta as melhores condições do tempo para avaliação dos dados, em relação aos demais conjuntos, foi prejudicado devido ao número insuficiente de elementos amostrais (apenas 3 pontos), não sendo possível a análise de correlação significativa. Para os conjuntos 2, 3 e 4, com números de elementos que possibilitaram as análises estatísticas ( $n = 10$ ,  $n = 12$  e  $n = 10$ , respectivamente), foram realizadas as análises de correlação e tendência.

A região utilizada na análise dos espectros de campo foi aquela entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nm, devido ao excesso de ruídos apresentados fora desse intervalo. Isto pode estar associado às más condições do tempo na tomada dos espectros, além da posição do sol em alguns horários da coleta.

Como discutido anteriormente, os dados foram normalizados a partir da aplicação de uma função logarítmica, devido a baixa concentração das variáveis limnológicas



no reservatório. Como a normalização das variáveis não melhorou a correlação, foi aplicado também a função logaritma às razões e diferenças de bandas.

As Figuras 39 e 40 mostram os resultados dessas correlações para o conjunto 2, considerando os valores resultantes das operações de razão e diferença de banda a cada uma das variáveis limnológicas analisadas.

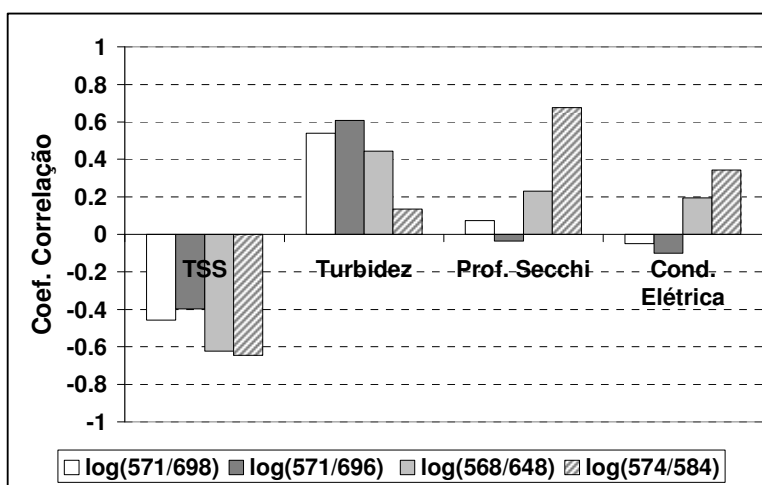


Figura 39 - Coeficiente de Correlação entre as variáveis limnológicas e razões de banda para o conjunto 2 (n = 10)

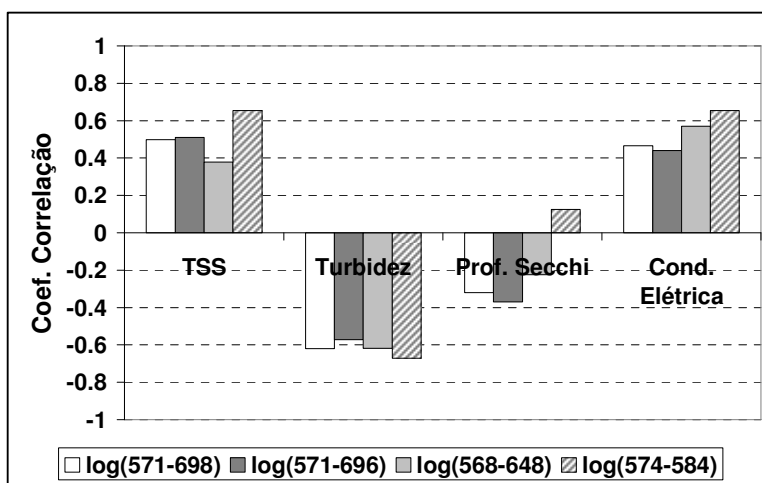


Figura 40 - Coeficiente de Correlação entre as v. limnológicas e diferenças de banda para o conjunto 2 (n = 10)

Analisando-se as Figuras 39 e 40 (correlações entre cada variável limnológica do conjunto 2 e os valores obtidos pela razão e diferença de banda, respectivamente), verifica-se que variáveis profundidade de Secchi e TSS estão

correlacionadas com a razão entre os comprimentos de onda 574 e 584 nm, respectivamente (-0,64;  $p = 0,044$ ) e (0,67;  $p = 0,032$ ), sendo estatisticamente significativas ao nível de 5%. Na Figura 39, observa-se que as variáveis Turbidez e Condutividade elétrica estão correlacionadas com a diferença entre os comprimentos de onda 574 e 584 nm, respectivamente (-0,67;  $p = 0,033$ ) e (0,65;  $p = 0,04$ ), sendo estatisticamente significativas ao nível de 5%. As demais correlações não foram significativas a um nível de significância de 5%.

Pode-se concluir que os elementos amostrais do conjunto 2 não sofreram muita interferência do vento nas análises das variáveis e que no intervalo de 574 e 584 nm foi possível detectar sólidos em suspensão na água.

Nas Figuras 41 e 42 são apresentados os resultados dessas correlações para o conjunto 3, considerando os valores resultantes das operações de razão e diferença de banda a cada uma das variáveis limnológicas analisadas.

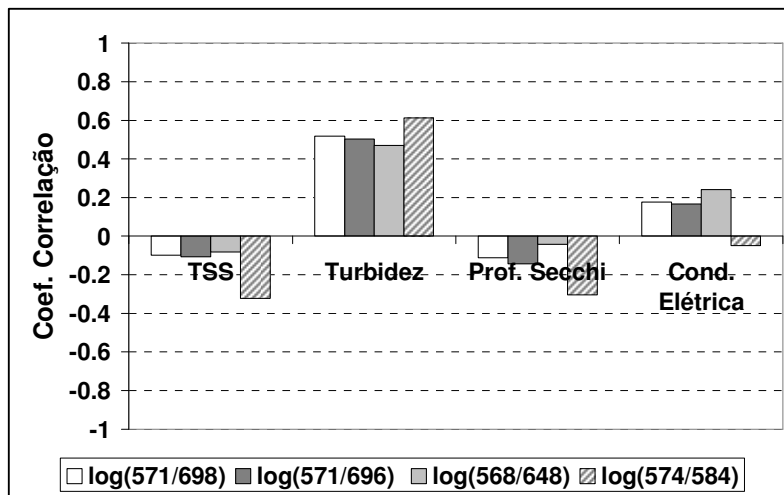


Figura 41 - Coeficiente de Correlação entre as v. limnológicas e razões de banda para o conjunto 3 (n = 12)

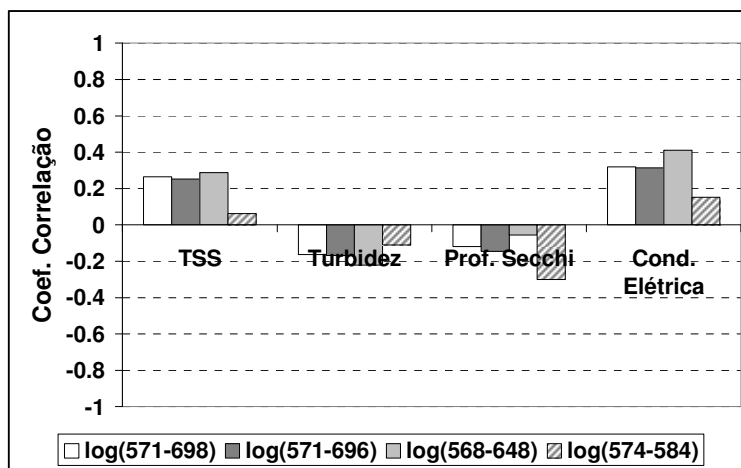


Figura 42 - Coeficiente de Correlação entre as v. limnológicas e *diferenças de banda* para o conjunto 3 (n = 12)

As Figuras 41 e 42 (correlações entre cada variável limnológica do conjunto 3 e os valores obtidos pela razão e diferença de banda, respectivamente) mostram a fraca correlação entre as variáveis limnológicas e as razões e diferenças nos comprimentos de onda estudados, com exceção da variável Turbidez que apresenta boa correlação com a razão 574/584, porém sem significância estatística. Portanto, conclui-se que o conjunto 3 foi muito prejudicado pela presença de nuvens.

Os coeficientes de correlação entre cada uma das variáveis limnológicas e os valores resultantes das razões e diferenças de bandas do conjunto 4 são apresentados nas Figuras 43 e 44, respectivamente.

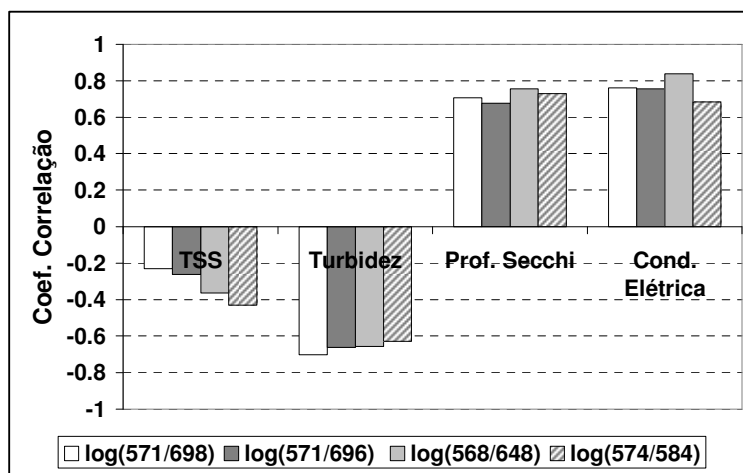


Figura 43 - Coeficiente de Correlação entre as variáveis limnológicas e *razões de banda* para o conjunto 4 (n = 10)

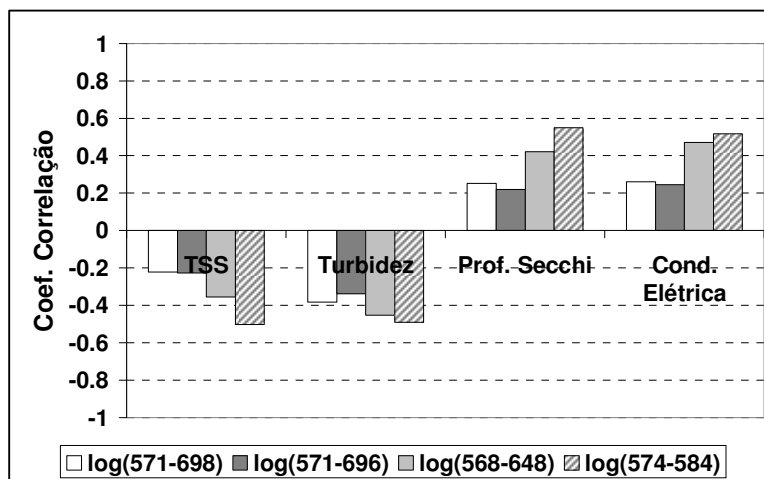


Figura 44 - Coeficiente de Correlação entre as variáveis limnológicas e *diferenças de banda* para o conjunto 4 (n = 10)

Observando-se a Figura 43, verifica-se que houve uma boa e significativa correlação entre a variável Turbidez e a razão entre 571 e 698 nm (0,70;  $p = 0,024$ ). A mesma variável apresentou correlação significativa também com a razão entre 571 e 696 nm (-0,66;  $p = 0,037$ ) e 568 e 648 nm (-0,65;  $p = 0,039$ ). A variável Profundidade de Secchi apresentou bons valores de correlação significativa para todas as razões entre os comprimentos de onda pesquisados: 571/698 nm (0,70;  $p = 0,022$ ); 571/696 nm (0,67;  $p = 0,032$ ); 568/648 (0,75;  $p = 0,012$ ) e 574/584 nm (0,73;  $p = 0,016$ ). Verificaram-se também altas e significativas correlações entre a variável Condutividade elétrica e todas as razões de banda analisadas: 571/698 nm (0,76;  $p = 0,011$ ); 571/696 n (0,75;  $p = 0,012$ ) e 568/648 nm (0,83;  $p = 0,003$ ), apresentando a melhor correlação do conjunto, e 574/584 nm (0,68;  $p = 0,029$ ).

Com relação à diferença de bandas (Figura 44), não foram verificadas correlações significativas para nenhuma das variáveis limnológicas, provavelmente devido às variações nas condições de iluminação e vento que interferirem nos valores absolutos das feições.

Conclui-se, portanto, que embora o conjunto 4 apresente as piores condições do tempo para a análise dos dados, os resultados foram os melhores para correlação entre as variáveis limnológicas consideradas (Condutividade elétrica, Profundidade de Secchi e Turbidez) e os valores relativos dos espectros. Esse fato deve ser tomado como um acaso e demonstra a dificuldade em se trabalhar com dados coletados diretamente na natureza. Embora tenha ocorrido redução do albedo para esse conjunto, o fato de ocorrer bons

resultados nas análises pode estar associado ao horário de coleta dos pontos amostrais, que ocorreu no período entre 11:58 h e 13:13 h, para a maioria dos pontos, período esse considerado ideal para a redução dos efeitos atmosféricos sob a superfície da água (MOBLEY, 1999; ESTEVES, 1998). O ponto 21 foi o único do conjunto coletado as 14:10 h, e como se pode observar na Figura 30 (item 6.2.2, p.82), apresentou a menor reflectância (2%) entre todos os pontos. As análises de tendência demonstraram não haver significância estatística entre as variáveis analisadas e as reflectâncias observadas para o conjunto 2 (céu aberto e vento de médio a forte). Esse fato demonstra que a presença de vento interferiu nas análises absoluta e relativa para tais variáveis no conjunto 2.

Para o conjunto 3 (céu nublado e vento fraco) também não foram observadas tendências significativas entre as variáveis e as reflectâncias tomadas em campo. Tal fato pode estar relacionado à presença de nuvens e ao horário de coleta dos dados em campo, entre 11:30 e 14:00 h, com um ponto coletado as 15:12 h (P31), onde pode ter ocorrido reflexão especular dos raios solares na superfície da água.

O conjunto 4 foi o que apresentou melhores resultados para as análises de tendência, para as variáveis Profundidade de Secchi e Condutividade Elétrica e razões 571/698 nm, 571/696 nm, 568/648 nm e 574/584 nm; e também para a variável Turbidez e a razão 571/698 nm. Verifica-se assim que nem o céu nublado nem a presença de vento (ondulação na superfície da água) prejudicaram as análises para essas variáveis, o que pode estar relacionado também ao horário de coleta de dados (entre 11:58 e 13:13 h) reduzindo o efeito de espalhamento especular dos raios solares na superfície da água (MOBLEY, 1999).

As análises de TSS demonstraram não haver presença significativa dessa variável no reservatório, uma vez que não ocorreram correlações entre esta e as reflectâncias medidas em campo. Como pode ser observado na Tabela 4 (pág.68), os valores dessa variável para o corpo d'água analisado são muito pequenos, da ordem de 0,22 mg/l. Portanto, é provável que as condições de iluminação (nebulosidade) e vento (ondas na superfície da água) não tenham sido as principais interferências nas análises do TSS.



## 7.2 Correlações entre as variáveis limnológicas e os parâmetros do contínuo removido

As análises de correlação entre os parâmetros das bandas de absorção do contínuo removido e as variáveis limnológicas foram realizadas para os quatro conjuntos de dados da amostra. A Figura 45 apresenta o gráfico dessas correlações para o conjunto 1.

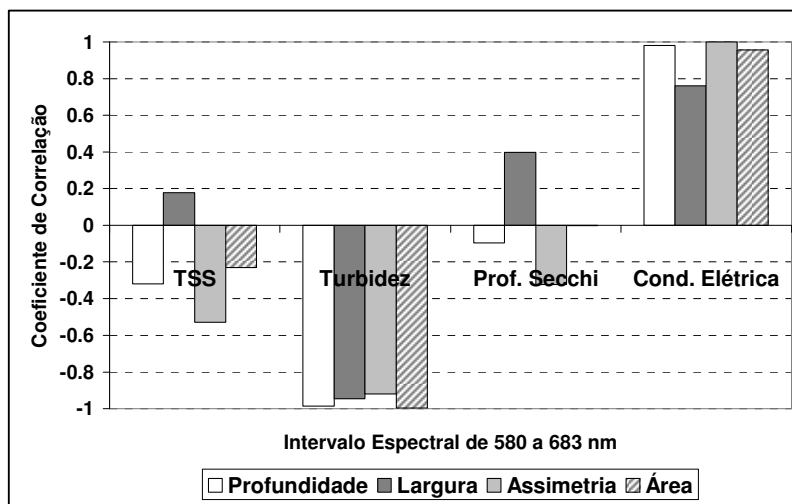


Figura 45 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros do contínuo removido e as concentrações das variáveis limnológicas, para o conjunto 1

Analisando a Figura 45 verifica-se que, embora ocorram altos valores de correlação entre Turbidez e Condutividade elétrica e os parâmetros de banda de absorção do contínuo removido, essas correlações não são significativas a um nível de significância de 5%. Entretanto, a variável Condutividade Elétrica apresentou resultado significativo indicando uma forte associação para a assimetria do contínuo removido (0,99;  $p = 0,020$ ); e a variável Turbidez com a Área do contínuo removido (-0,99;  $p = 0,049$ ).

Na Figura 46 observa-se as correlações entre as variáveis limnológicas e os parâmetros do contínuo removido para o conjunto 2.

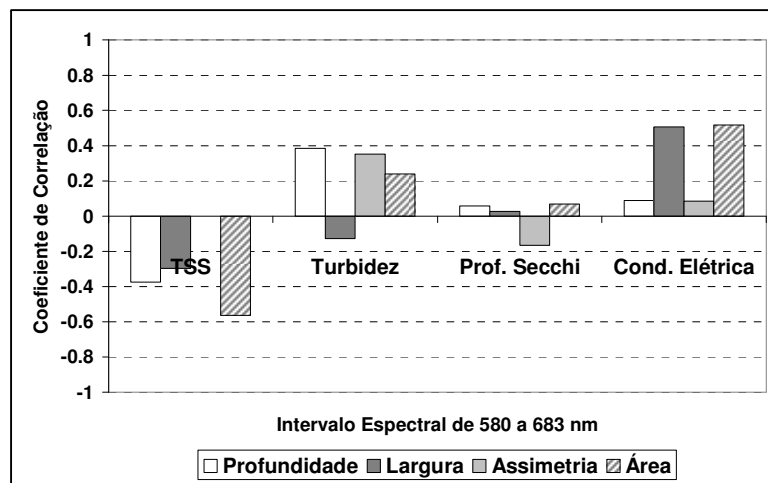


Figura 46 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros do contínuo removido e as concentrações das variáveis limnológicas, para o conjunto 2

Observa-se, na Figura 46, os baixos valores de correlação encontrados entre as variáveis limnológicas e os parâmetros de banda de absorção do contínuo removido para o conjunto 2. Além disso, verificou-se que os coeficientes de correlação apresentaram resultados não significativos para os dados do conjunto 2, com p-valores menores que 0,05, o que não é significativo ao nível de 5%.

A Figura 47 apresenta o gráfico das correlações entre as variáveis limnológicas e os parâmetros do contínuo removido para o conjunto 3.

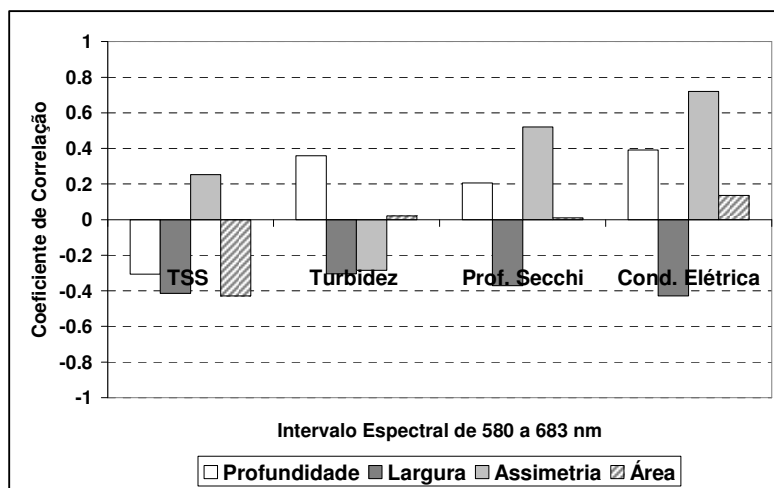


Figura 47 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros do contínuo removido e as concentrações das variáveis limnológicas, para o conjunto 3

Na Figura 47, verifica-se que as correlações foram baixas e também não significativas, com exceção da correlação entre a variável Condutividade Elétrica e o parâmetro Assimetria, que apresentou um forte coeficiente de correlação ( $r = 0,72$ ) com  $p$ -valor = 0,008.

A Figura 48 mostra as correlações entre as variáveis limnológicas e os parâmetros do contínuo removido para o conjunto 4.

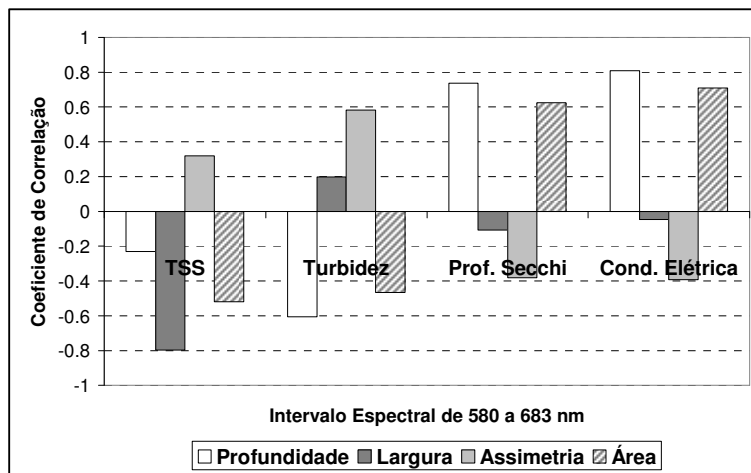


Figura 48 - Coeficientes de Correlação entre os parâmetros do contínuo removido e as concentrações das variáveis limnológicas, para o conjunto 4

Os coeficientes de correlação obtidos para o conjunto 4 foram altos (Figura 48), embora nem todos sejam significativos. A variável Profundidade de Secchi e parâmetro profundidade apresenta coeficiente de correlação igual a 0,73 e  $p = 0,015$ . A variável TSS apresenta correlação significativa com o parâmetro largura de banda (-0,79;  $p = 0,006$ ); e a variável Condutividade Elétrica apresenta correlações significativas com os parâmetros profundidade de banda (0,81;  $p = 0,005$ ) e área de banda (0,71;  $p = 0,022$ ).

Assim, como ocorrido nas análises de correlação realizadas entre as variáveis limnológicas e as razões e diferenças de banda dos espectros (item 7.1, p.100), aqui também o conjunto 4 foi o que resultou nas melhores correlações. Verifica-se que a variável TSS indicou, pela primeira vez dentre todas as análises realizadas, forte e significativa correlação com o parâmetro largura de banda do contínuo removido, levando a inferir que a largura da banda de absorção dessa feição (580 a 639 nm) para o conjunto 4, possa estar associada a uma maior concentração de TSS nessa região espectral (GOODIN et al., 1993; KIRK, 1994; DEKKER, 1993).

### 7.3 Correlações entre as variáveis limnológicas e os valores de reflectância aparente das bandas do Ikonos de fevereiro de 2007

Os valores de reflectância aparente dos pontos amostrados em campo nas quatro bandas da imagem multiespectral foram submetidos a análises de correlação. As análises realizadas foram: entre as bandas da imagem; entre as bandas e as variáveis limnológicas; e entre as bandas e os dados espectrais observados “in situ”. Tentou-se analisar as correlações considerando os quatro conjuntos de dados em que a amostra foi dividida, segundo as condições de tempo anteriormente discutidas neste capítulo, porém, nem todos os pontos puderam ser lidos na imagem multiespectral de fevereiro, devido a presença de nuvens.

Desse modo, o conjunto 1, com 3 pontos (P30, P32 e P36) e o conjunto 2, com 10 pontos (P22, P23, P25, P26, P27, P28, P29, P33, P34 e P35) não foram incluídos nas análises, pois seus pontos encontravam-se sob as nuvens. O conjunto 2 apresentou dois pontos cujos valores de reflectância puderam ser lidos (P34 e P35), os quais foram usados como referência, devido a impossibilidade de aplicar correlação e tendência nos mesmos ( $n = 2$  sugere não normalidade dos dados). Portanto, as análises foram feitas utilizando-se o conjunto 3, com  $n = 11$  pontos (P02, P05, P06, P07, P08, P09, P10, P12, P15, P16 e P19), sendo o ponto 31 descartado por encontrar-se sob as nuvens; e o conjunto 4, com 10 pontos (P01, P03, P14, P17, P18, P21, P104, P111, P117 e P129).

A Tabela 18 apresenta as correlações entre as bandas espectrais da imagem Ikonos de fevereiro de 2007.

Tabela 18 - Matriz de correlação entre as bandas do Ikonos fevereiro de 2007 ( $\alpha = 5\%$ )

	<b>B1 (Azul)</b>	<b>B2 (verde)</b>	<b>B3 (vermelho)</b>	<b>B4 (infra-verm. Próximo)</b>
<b>B1 (azul)</b>	1			
<b>B2 (verde)</b>	0,966 (0)	1		
<b>B3 (vermelho)</b>	0,883 (0)	0,944 (0)	1	
<b>B4 (infra-verm. próximo)</b>	0,564 (0.010)	0,676 (0.001)	0,808 (0)	1

As correlações entre os valores de reflectância espectral variaram de 0,564 a 0,966 (Tabela 18). A alta correlação entre os valores de reflectância das bandas Ikonos indica que essas bandas medem propriedades semelhantes no estudo (EKERCIN, 2007). Os valores



mais baixos de correlação ocorrem entre as bandas B4 com B1 (0,564) e com B2 (0,676), isto porque as bandas B1, B2 e B3 correspondem à faixa do espectro eletromagnético de luz visível, e a B4 corresponde a região do espectro do infra-vermelho próximo.

Foram realizadas também análises de correlação entre os valores de reflectância espectral das bandas do Ikonos e as variáveis limnológicas, que neste estudo foram associados à qualidade da água do reservatório. Os coeficientes de correlação obtidos são apresentados para o conjunto 3 (Figura 49) e para o conjunto 4 (Figura 50).

Na Tabela 19 observa-se as altas correlações entre as bandas do Ikonos para o conjunto 3. Isso deverá ser levado em conta quando da aplicação dos modelos de regressão.

Tabela 19 - Correlação entre as bandas Ikonos para os 11 pontos do conjunto 3

	B1	B2	B3	B4
B1	1 (0)			
B2	0,969 (0)	1 (0)		
B3	0,936 (0)	0,967 (0)	1 (0)	
B4	0,715 (0,013)	0,811 (0,002)	0,9 (0)	1 (0)

A Figura 49 apresenta os coeficientes de correlação entre as variáveis limnológicas e as bandas espectrais da imagem multiespectral Ikonos de fevereiro de 2007, para o conjunto 3.

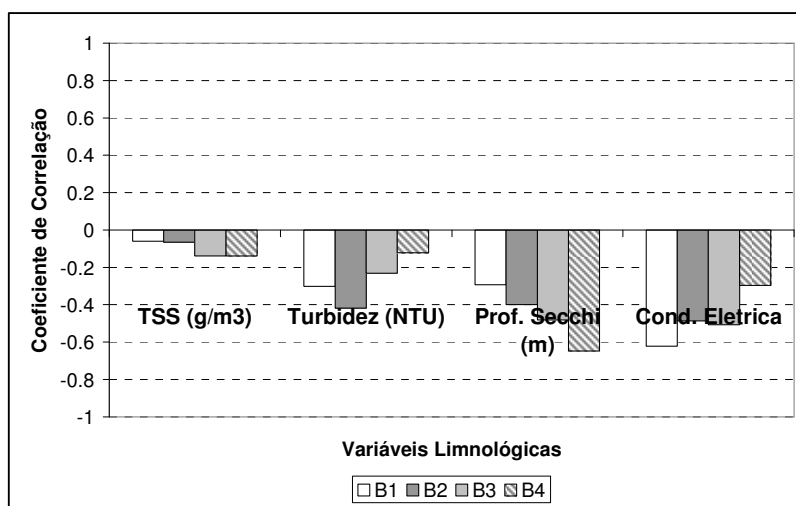


Figura 49 - Coeficiente de correlação entre as variáveis limnológicas e as bandas espectrais da imagem multiespectral Ikonos – fevereiro 2007, para o conjunto 3

Observa-se, na Figura 49, que correlações significativas ocorrem apenas para Profundidade de Secchi e B4 (-0,648;  $p = 0,031$ ) e Condutividade elétrica e B1 (-0,622;  $p = 0,041$ ). As demais correlações não são significativas a 5%.

A Tabela 20 apresenta as altas correlações entre as bandas da imagem Ikonos para os 10 pontos do conjunto 4. Esse fato influenciará na aplicação dos modelos de regressão.

Tabela 20 - Correlação entre as bandas Ikonos para os 10 pontos do conjunto 4

	B1	B2	B3	B4
B1	1 (0)			
B2	0,999 (0)	1 (0)		
B3	0,994 (0)	0,995 (0)	1 (0)	
B4	0,952 (0)	0,955 (0,002)	0,969 (0)	1 (0)

A Figura 50 mostra os coeficientes de correlação entre as variáveis limnológicas e as bandas espectrais da imagem multiespectral Ikonos de fevereiro de 2007, para o conjunto 4.

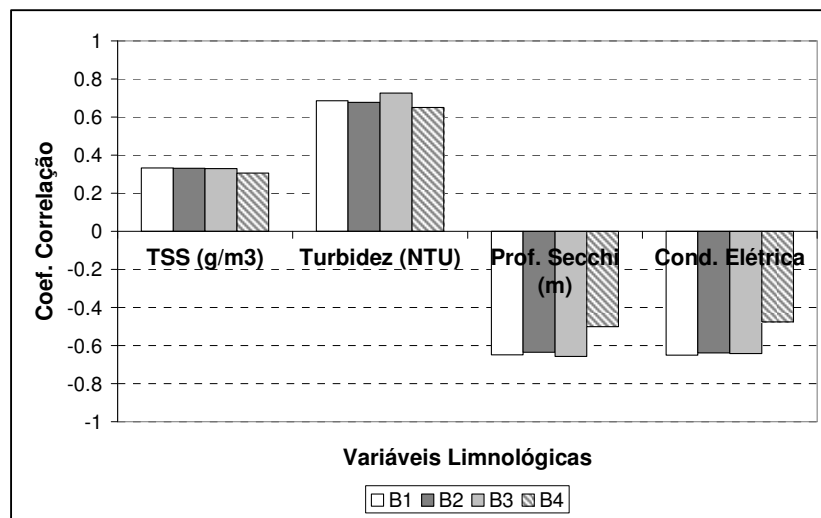


Figura 50 - Coeficiente de correlação entre as variáveis limnológicas e as bandas espectrais da imagem multiespectral Ikonos – fevereiro 2007, para o conjunto 4

Pode-se observar, na Figura 50, que as correlações significativas ao nível de significância de 5% para as variáveis: Turbidez e B1 (0,685;  $p = 0,042$ ); e B2 (0,677;  $p =$

0,032); e B3 (0,725;  $p = 0,018$ ) e B4 (0,649;  $p = 0,042$ ); Profundidade de Secchi e B1 (-0,649;  $p = 0,042$ ); e B2 (-0,636;  $p = 0,048$ ); e B3 (-0,656;  $p = 0,039$ ); e Condutividade Elétrica e B1 (-0,649;  $p = 0,042$ ); e B2 (-0,638;  $p = 0,047$ ); e B3 (-0,641;  $p = 0,046$ ).

#### 7.4 Correlações entre as variáveis limnológicas e os valores resultantes da razão de bandas do Ikonos de fevereiro de 2007

A Tabela 21 apresenta as correlações entre as razões de bandas da imagem Ikonos para o conjunto 3.

Tabela 21 - Correlações entre as razões de bandas do Ikonos, para o conjunto 3

	$B3/B2$	$(B2-B3)/(B2+B3)$	$(B2-B4)/(B2+B4)$	$B4/B3$	$B3/B1$	$B4/B1$	$B3/B4$	$B1/B2$	$B2/B3$	$B1/B4$
$B3/B2$	1 (0)									
$(B2-B3)/(B2+B3)$	<b>-0,999 (0)</b>	1 (0)								
$(B2-B4)/(B2+B4)$	<b>-0,703 (0)</b>	<b>0,708 (0,015)</b>	1 (0)							
$B4/B3$	0,530 (0,09)	-0,538 (0,088)	<b>-0,974 (0)</b>	1 (0)						
$B3/B1$	<b>0,759 (0,007)</b>	<b>-0,756 (0,007)</b>	<b>-0,862 (0,001)</b>	<b>0,813 (0,002)</b>	1 (0)					
$B4/B1$	<b>0,617 (0,043)</b>	<b>-0,621 (0,042)</b>	<b>-0,967 (0)</b>	<b>0,974 (0)</b>	<b>0,918 (0)</b>	1 (0)				
$B3/B4$	-0,353 (0,286)	0,359 (0,278)	<b>0,792 (0,004)</b>	<b>-0,802 (0,003)</b>	-0,477 (0,138)	<b>-0,690 (0,019)</b>	1 (0)			
$B1/B2$	0,057 (0,868)	-0,063 (0,854)	0,454 (0,161)	-0,580 (0,062)	<b>-0,603 (0,049)</b>	<b>-0,636 (0,036)</b>	0,313 (0,349)	1 (0)		
$B2/B3$	<b>-0,993 (0)</b>	<b>0,997 (0)</b>	<b>0,713 (0,014)</b>	-0,549 (0,081)	<b>-0,748 (0,008)</b>	<b>-0,625 (0,040)</b>	0,368 (0,265)	-0,072 (0,833)	1 (0)	
$B1/B4$	-0,390 (0,236)	0,396 (0,228)	<b>0,813 (0,002)</b>	<b>-0,818 (0,002)</b>	-0,520 (0,101)	<b>-0,716 (0,013)</b>	<b>0,998 (0)</b>	0,336 (0,312)	0,404 (0,218)	1 (0)

Nota-se na tabela 21 que nem todos os valores apresentam significância estatística ao nível de 5%. Os valores em negrito são aqueles onde há significância e portanto os valores de correlação são altos.

As análises de correlação aplicadas às razões de bandas espectrais da imagem Ikonos de fevereiro para o conjunto 3 e variáveis limnológicas disponíveis para a pesquisa, são apresentadas na Figura 51.



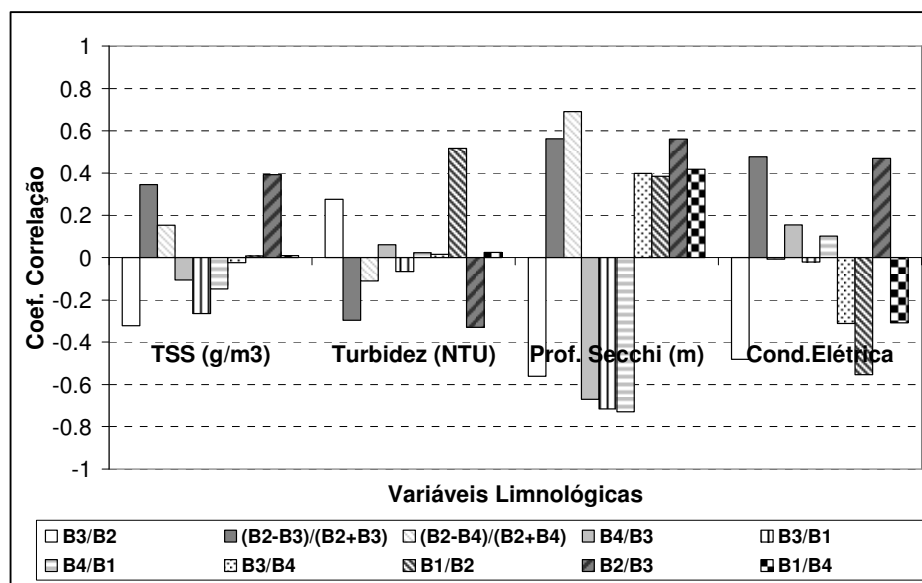


Figura 51 - Coeficiente de Correlação entre razões de bandas aplicadas à Imagem Multiespectral Ikonos\_fevereiro 2007 e as variáveis limnológicas, para o conjunto 3

A Figura 51 mostra que somente a variável Profundidade de Secchi apresentou correlações significativas a 5% com as razões pesquisadas. A melhor correlação ocorreu entre Prof. Secchi e a razão (B4/B1), com  $r = -0,728$ ;  $p = 0,011$ . Com a razão (B3/B1), a correlação também foi alta ( $-0,716$ ;  $p = 0,013$ ), enquanto que a razão (B2-B4)/(B2+B4) o valor de correlação foi um pouco menor ( $0,692$ ;  $p = 0,018$ ), ocorrendo o mesmo para a razão (B4/B3), com  $r = -0,67$ ;  $p = 0,024$ .

Na Tabela 22 observa-se as correlações entre as razões de bandas para a imagem Ikonos.

Tabela 22 - Correlações entre as razões de bandas do Ikonos para o conjunto 4

	$B3/B2$	$(B2-B3)/(B2+B3)$	$(B2-B4)/(B2+B4)$	$B4/B3$	$B3/B1$	$B4/B1$	$B3/B4$	$B1/B2$	$B2/B3$	$B1/B4$
$B3/B2$	1 (0)									
$(B2-B3)/(B2+B3)$	<b>-0,998 (0)</b>	1 (0)								
$B2-B4/B2+B4$	<b>-0,730 (0)</b> <b>0,017</b>	<b>0,701 (0)</b> <b>0,024</b>	1 (0)							
$B4/B3$	0,594 (0,07)	-0,558 (0,094)	<b>-0,978 (0)</b>	1 (0)						
$B3/B1$	<b>0,991 (0)</b>	<b>-0,986 (0)</b>	<b>-0,798 (0)</b> <b>0,006</b>	<b>0,676 (0)</b> <b>0,032</b>	1 (0)					
$B4/B1$	<b>0,748 (0)</b> <b>0,013</b>	<b>-0,712 (0)</b> <b>0,021</b>	<b>-0,985 (0)</b>	<b>0,965 (0)</b> <b>0,005</b>	<b>0,806 (0)</b> <b>0,005</b>	1 (0)				
$B3/B4$	-0,242 0,501	0,211 0,558	<b>0,824 (0)</b> <b>0,003</b>	<b>-0,883 (0)</b> <b>0,001</b>	-0,351 0,319	-0,760 0,011	1 (0)			
$B1/B2$	-0,363 0,302	0,354 0,315	<b>0,693 (0)</b> <b>0,026</b>	<b>-0,724 (0)</b> <b>0,018</b>	-0,481 0,159	<b>-0,622 (0)</b> <b>0,055</b>	<b>0,74 (0)</b> <b>0,014</b>	1 (0)		
$B2/B3$	<b>-0,988 (0)</b>	<b>0,996 (0)</b>	<b>0,660 (0)</b> <b>0,038</b>	-0,512 0,130	<b>-0,974 (0)</b>	<b>-0,663 (0)</b> <b>0,037</b>	0,173 0,633	0,343 0,332	1 (0)	
$B1/B4$	-0,570 0,086	0,554 0,097	<b>0,922 (0)</b>	<b>-0,923 (0)</b>	<b>-0,666 (0)</b> <b>0,036</b>	<b>-0,853 (0)</b> <b>0,002</b>	<b>0,90 (0)</b> <b>0,002</b>	<b>0,855 (0)</b> <b>0,002</b>	0,533 0,112	1 (0)

Observa-se na tabela que nem todos os valores apresentam significância estatística ao nível de 5%. Os valores em negrito são aqueles onde há significância e altos valores de correlação, embora ocorram outras correlações significativas, porém com valores mais baixos (próximos de 0,5), que não foram consideradas na construção dos modelos.

As análises de correlação aplicadas às bandas espectrais da imagem Ikonos de fevereiro para o conjunto 4, com aplicação de razão de bandas, e variáveis limnológicas disponíveis para a pesquisa são apresentadas na Figura 52.



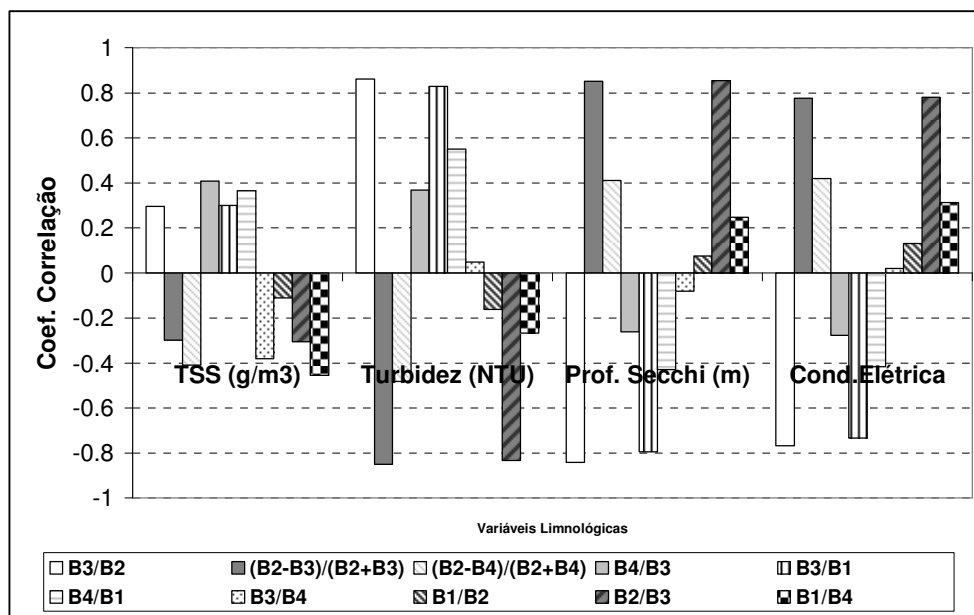


Figura 52 - Coeficiente de Correlação entre razões de bandas aplicadas à Imagem Multiespectral Ikonos\_fevereiro 2007 e as variáveis limnológicas, para o conjunto 4

A Figura 52 mostra que somente a variável TSS não apresentou correlações significativas entre as razões estudadas. A variável Turbidez apresentou valores de  $r$  significativos a 5%, entre ela e as razões de banda: (B3/B2) (0,861;  $p = 0,001$ ); (B2-B3)/(B2+B3) (-0,851;  $p = 0,002$ ); (B3/B1) (0,828;  $p = 0,003$ ) e (B2/B3) (-0,833;  $p = 0,003$ ). Para a Profundidade de Secchi também foram encontradas altas correlações entre ela e as razões: (B3/B2) (-0,842;  $p = 0,002$ ); (B2-B3)/(B2+B3) (0,850;  $p = 0,002$ ); (B3/B1) (-0,795;  $p = 0,006$ ) e (B2/B3) (0,854;  $p = 0,002$ ). As correlações entre condutividade elétrica e as razões de bandas foram muito boas e significativas, assim como as demais variáveis apresentadas. Para condutividade elétrica os valores de  $r$  foram (-0,768;  $p = 0,009$ ) para a razão (B3/B2); (0,777;  $p = 0,008$ ) para a razão (B2-B3)/(B2+B3); (-0,734;  $p = 0,016$ ) para a razão (B3/B1) e (0,781;  $p = 0,008$ ) para a razão (B2/B3).

## **8 MODELOS EMPÍRICOS PARA INFERÊNCIA DOS COMPONENTES DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DE ITUPARARANGA**

Pesquisas científicas que estudam ambientes aquáticos objetivando analisar a qualidade de suas águas utilizam, de um modo geral, análises de correlação entre as concentrações dos componentes opticamente ativos e informações espectrais de corpos d'água obtidas em laboratório e em trabalhos de campo (RUNDQUIST et al., 1996; LOUCHARD, 2002; GOODIN et al., 1993; CHEN et al., 1992; BRAGA, 1999; BARBOSA, 2005; NOBREGA, 2005; RUDORFF, 2006), enquanto outros autores estimaram com êxito as concentrações desses componentes a partir de dados orbitais (DEKKER, 1995; GIARDINO et al., 2001; RITCHIE & COOPER, 1988; SCARPACE et al., 1979; EKERCIN, 2007; GALVÃO et al., 2003; MALTHUS & DEKKER, 1995; NOVO et al., 2006). Em ambos os casos, a construção de modelos empíricos para estimar alguns dos componentes, a partir de outros observados em campo, permitem uma maior representatividade espacial da variável e reduzem os custos do trabalho de campo, muitas vezes com a redução das análises de laboratório.

Diante disso, são apresentadas as análises realizadas para a construção de modelos empíricos objetivando a inferência de alguns componentes da água no Reservatório de Itupararanga, aqui representados por: Sólidos em Suspensão (TSS), Turbidez e Condutividade Elétrica, por serem estas as variáveis limnológicas analisadas nesta pesquisa. A transparência da água, que é uma característica ou propriedade física do corpo d'água, aqui obtida a partir da profundidade do disco de Secchi, também foi avaliada. Nesse sentido, primeiramente foram observadas as correlações entre as variáveis limnológicas e curvas de reflectância tomadas em campo e bandas espectrais da imagem Ikonos de fevereiro de 2007. No processo considerou-se a separação da amostra nos quatro conjuntos, de acordo com as condições do tempo, conforme discutido no capítulo 6.4 (Análises de Correlação). Detectadas as correlações, análises de regressão linear tradicional (simples ou múltipla) foram aplicadas a cada conjunto de dados correlacionados.

O modelo de regressão é uma das ferramentas estatísticas mais usadas de inferência, que considera o relacionamento entre duas ou mais variáveis, de modo que uma delas possa ser estimada a partir das demais (TACHIBANA et al., 2007). Os modelos de regressão supõem, de modo geral, que uma variável resposta dependente (Y) pode ser



explicada por uma função de variáveis explicativas independentes ( $X_1, X_2, \dots$ ), na seguinte relação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (8)$$

em que  $p$  covariáveis ou variáveis explicativas são consideradas no modelo, sendo  $\varepsilon$  o erro não observado.

Na regressão tradicional o procedimento de mínimos quadrados ordinários estabelece um modelo de predição que fornece o menor valor da soma do quadrado dos erros. As inferências são obtidas a partir das exigências de normalidade dos erros, com média zero e variância constante  $\sigma^2$ , e independência entre si, ou seja,  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$  e  $\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ ,  $i \neq j$ . Essa suposição implica que a variável resposta  $Y$  também tenha distribuição normal (TACHIBANA et al., 2007; CHARNET et al., 1999).

Na presente pesquisa, as análises de regressão foram realizadas com o aplicativo Minitab, utilizando os métodos disponíveis para Regressão Simples (*Regression*) e para Regressão Múltipla (*Best Subsets*), sendo que nesse último caso o melhor modelo é escolhido dentre todos os possíveis apresentados no processamento, seguindo o critério de menor número de variáveis explicativas independentes ( $X$ 's) envolvidas no modelo, desde que obedecidas algumas exigências, que são, segundo Charnet et al. (1999):

- maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado), que indica quanto da variação de  $Y$  é explicada pelo modelo;
- estatística  $C_p$  de Mallows, que verifica a adequabilidade do modelo, comparando se o valor observado de  $C_p$ , apresentado pelo modelo é próximo de  $p$  (número de parâmetros estimado no modelo), ou seja,  $C_p \sim p$ ;
- menor  $\sigma^2$

Após definido o melhor modelo empírico a partir da aplicação da regressão múltipla, o critério considerado para testar o impacto da colinearidade, ou seja, associação entre duas variáveis independentes, foi o fator de inflação da variação (VIF), que mede quanto a variância de um coeficiente de regressão estimado aumenta se as variáveis independentes são correlacionadas. Valores de VIF pequenos (próximos de 1) indicam baixa correlação entre as variáveis e valores grandes (acima de 5) que as estimativas dos coeficientes de regressão



são ruins (TACHIBANA et al., 2007; CHARNET et al., 1999). O p-valor do modelo estimado pelo procedimento de regressão e dos coeficientes estimados, ou seja das variáveis explicativas independentes, foram analisados ao nível de significância de 5%. Nesta etapa foi também avaliada a possibilidade de melhora do modelo estatístico com a regressão aplicada sem a constante, analisando-se para isso a significância a 5% do p-valor para as variáveis dependentes.

Outra exigência dos modelos de regressão, que também foi considerada neste trabalho, é a análise dos resíduos, que permite a visualização de quais conjuntos de variáveis apresentam melhor ajuste ao modelo. Os resíduos devem apresentar as propriedades de normalidade e variância constante (CHARNET et al., 1999; CRUSCO et al., 2005). Para a normalidade foram avaliados o gráfico de normalidade dos resíduos e o teste formal de Anderson-Darling, ao nível de significância de 5%. Para analisar a variância constante dos erros foi observado visualmente no gráfico dos resíduos com as variáveis ajustadas o padrão das variâncias.

A validação dos modelos de regressão foram realizadas pela adaptação do método de múltiplas subamostras conhecido por “*jackknife*” (Lachenbruch, 1967 *apud* NEOPHYTOU et al, 2000). Este método é aplicado a amostras de tamanhos pequenos, pois permite a utilização de todas as observações na estimação dos parâmetros do modelo (NEOPHYTOU et al., 2000). Baseia-se no princípio “*leave-one-out*” que consiste em separar uma observação da amostra original, estimar os coeficientes do modelo com base no restante da amostra (n-1) e estimar a observação reservada utilizando a nova equação. O procedimento é repetido para toda a amostra (n vezes), tal que todas as observações sejam estimadas por modelos cujos parâmetros foram estimados com base nas demais. O percentual de classificações corretas é acumulado para todos os elementos amostrais da amostra, indicando a precisão global do modelo. Nesta pesquisa adotou-se o método adaptado “*jackknife*” pela impossibilidade de conhecer o intervalo de confiança do valor real de cada elemento amostral pertencente à amostra original, devido ao tamanho pequeno da mesma. Portanto, não foi possível calcular a precisão global do modelo.

O conjunto 1, com n = 3 observações, não foi considerado na construção dos modelos de regressão por ser assimétrico e não apresentar a distribuição normal, devido ao pequeno número de elementos desse conjunto. Ocorreu também que seus pontos não puderam ser lidos na imagem multiespectral Ikonos de fevereiro, devido a presença de nuvens.



O conjunto 2, com  $n = 10$  observações, foi considerado na construção dos modelos de regressão para as variáveis limnológicas TSS e Turbidez, porém as variáveis explicativas independentes consideradas foram somente as variáveis limnológicas e as técnicas de razão e diferença de bandas aplicadas às curvas de reflectância obtidas em campo com espectrorradiômetro (ambas linearizadas a partir da função logarítmica) (ver Capítulo 7 – Análises de Correlação). As bandas da imagem multiespectral Ikonos não foram incluídas, pelo fato de não ter sido possível a leitura da maioria dos pontos na imagem, que se encontravam sob nuvens, conforme discutido anteriormente. Para o conjunto 2 os modelos possíveis de serem gerados, segundo as exigências estatísticas já discutidas e conforme as análises de correlação apresentadas no Capítulo 7, foram para as variáveis dependentes (Y): *Log (TSS)* e *Log (Turbidez)*. Os modelos para Condutividade Elétrica e Profundidade de Secchi não foram gerados, pois essas variáveis não apresentaram distribuição normal e a transformação para normalidade não foi possível.

Para o conjunto 3, com  $n = 12$ , foi possível a construção de modelo de regressão utilizando como variáveis independentes as curvas espectrais com contínuo removido e a aplicação de razão e diferença de bandas nestes, além das bandas originais e a razão de bandas da imagem multiespectral Ikonos adquirida em fevereiro. Os modelos de regressão para Condutividade Elétrica e Profundidade de Secchi foram os únicos possíveis dentre as quatro variáveis avaliadas (TSS, Turbidez, Condutividade Elétrica e Profundidade de Secchi), pois responderam a todas as exigências estatísticas relacionadas no início deste capítulo. Os pontos pertencentes a esse conjunto encontram-se nas regiões sem cobertura de nuvens da imagem multiespectral, por isso as bandas da imagem fizeram parte das variáveis explicativas.

Embora a Condutividade Elétrica não represente uma componente opticamente ativa do corpo d'água, optou-se em modelá-la na expectativa de obter alguma resposta indicadora de clorofila *a* no reservatório, visto que alguns autores relacionam uma associação entre essas duas componentes (Condutividade Elétrica e clorofila *a*) (ROCHA, 2003; ESTEVES, 1998 e VAN NIEUWENHUYSE & JONES, 1996).

A construção de modelos de regressão para o conjunto 4,  $n = 10$ , levou em consideração tanto as variáveis limnológicas e as curvas espectrais obtidas em campo (com normalização pela função logarítmica) como variáveis explicativas independentes, quanto as curvas espectrais com contínuo removido (com aplicação das técnicas de razão e diferença de



bandas) e as bandas da imagem multiespectral Ikonos\_fevereiro originais e com aplicação de razão de bandas. Nesse sentido, foram possíveis, dentre todas as exigências estatísticas anteriormente relacionadas, dois modelos de regressão para esse conjunto, que relacionaram as variáveis dependentes  $(Y) = TSS$  e  $(Y) = Turbidez$ , com as seguintes variáveis independentes, respectivamente: curvas espectrais com remoção do contínuo e as bandas da imagem multiespectral Ikonos de fevereiro; e a razão de bandas da imagem multiespectral Ikonos. Os modelos testados para as variáveis dependentes Profundidade de Secchi e Condutividade Elétrica não foram construídos, por não haver nenhuma transformação que os tornassem com distribuição normal.

A distribuição espacial da variabilidade na concentração de Turbidez (NTU) para o conjunto 4 e Profundidade de Secchi para o conjunto 3, estimadas a partir da razão de bandas da imagem multiespectral Ikonos, foram as duas únicas possíveis de serem aplicadas. Para todos os modelos gerados foi realizado o teste estatístico de validação adaptado de “jackknife”. Os modelos empíricos de inferência são apresentados a seguir.

### 8.1 Modelos Empíricos para Inferência de Sólidos em Suspensão (TSS) e Turbidez para o Conjunto 2 (céu aberto e vento médio)

Os modelos de regressão múltipla gerados pelo método “*Best Subsets*” no Minitab, após vários testes realizados considerando todas as variáveis independentes que apresentaram correlação e significância estatística para inferência de sólidos em suspensão (TSS), nos 10 pontos do conjunto 2, são apresentados na Tabela 23. Antes, porém da aplicação do método, foi realizado o teste formal de Normalidade Anderson-Darling da variável dependente TSS (A.D. = 0,125 e p-valor = 0,977), ao nível de significância de 5%.

Tabela 23 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “*Best Subsets*” para TSS, Conjunto 2

Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp_Mallows	$\sigma^2$	Log (Prof. Secchi)	Log (Cond. Elétrica)	Log (574/584)	Log (574-584)
1	51,5	2,8	0,21786	X			
1	34,3	6	0,25338			X	
2	55,7	3,1	0,20803	X			X
2	48,9	4,1	0,22354	X		X	
3	<b>57,4</b>	<b>3,8</b>	<b>0,20406</b>	X	X		X
3	54,6	4,2	0,21072	X		X	X
4	56,1	5	0,20723	X	X	X	X



Cada linha da Tabela 23 refere-se a um modelo diferente envolvendo as variáveis independentes testadas e a variável resposta TSS. As colunas apresentam o número de variáveis independentes relacionadas no modelo específico (Var.), seguido pelo valor do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado), estatística Cp\_Mallows, variância ( $\sigma^2$ ), e as variáveis independentes utilizadas no modelo, marcadas com X.

A escolha do melhor modelo dentre aqueles apresentados na Tabela 23 é definida, a princípio, pelo menor número de variáveis envolvidas na construção do modelo, conforme discutido no início do Capítulo 8, desde que obedecidas as seguintes exigências:

- Maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado);
- Estatística Cp\_Mallows  $\sim p$ ;
- Menor  $\sigma^2$

Todas as exigências acima descritas foram observadas no modelo que envolve 3 variáveis independentes: Log (Prof. Secchi), Log (Condutividade Elétrica) e Log (574 – 584), com  $R^2$  ajustado explicando 57,4% da variabilidade dos dados,  $\sigma^2$  menor em relação aos demais e Cp\_Mallows adequado com  $Cp = 3,8 \sim p = 4$  (3 variáveis independentes + 1 variável dependente).

O resultado da aplicação da análise de regressão é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 – Estatísticas da Análise de Regressão Múltipla

Coefficientes Estimados	p-valor	VIF	p-valor sem constante
Constante	0,275	-	
Log (Prof. Secchi)	0,043	1,4	0,010
Log (Condutividade)	0,302	2,3	0,091
Log (574-584)	0,128	1,9	0,251

O p-valor resultante da análise de variância do modelo estimado pelo procedimento de regressão apresentou-se significativo ao nível de 5% (p-valor = 0,044). O p-valor do coeficiente estimado de Log (Prof. Secchi), igual a 0,043 (Tabela 24), indica que essa é a única variável significativamente relacionada com TSS para o conjunto 2. O p-valor das demais variáveis não foi significativo a 5%, como pode ser verificado na Tabela 24. Isso sugere que o modelo mais apropriado é aquele que utiliza somente a variável explicativa Log (Prof. Secchi). Na Tabela 24 são apresentados também os valores de VIF, ou seja, o grau de associação entre as variáveis independentes envolvidas no modelo. Novamente, a variável Log



(Prof. Secchi) apresenta-se como a mais apropriada para a construção do modelo, visto que o valor de VIF, próximo de 1, indica baixa correlação entre as variáveis. O modelo foi avaliado também sem a constante e como pode-se observar na Tabela 24, os p-valores resultantes não melhoraram os resultados para as variáveis condutividade elétrica e (574-584).

Portanto, o modelo para inferência de sólidos em suspensão para o conjunto 2, com  $n = 10$  é definido pela seguinte equação (8):

$$\text{Log}(TSS) = 1,01 - 4,54 * \text{Log}(\text{Profundidade de Secchi}) \quad (8)$$

Os resultados da regressão para o modelo estimado apresentaram as seguintes estatísticas: p-valor do coeficiente estimado Log (Prof. Secchi) igual a 0,012, indicando que o modelo é significativo a 5% e um bom resultado para  $R^2$  ajustado, indicando que a Profundidade de Secchi explica 51,5% da variabilidade em TSS.

Os gráficos dos resíduos do modelo para TSS são apresentados na Figura 53 e suas análises na Tabela 25.



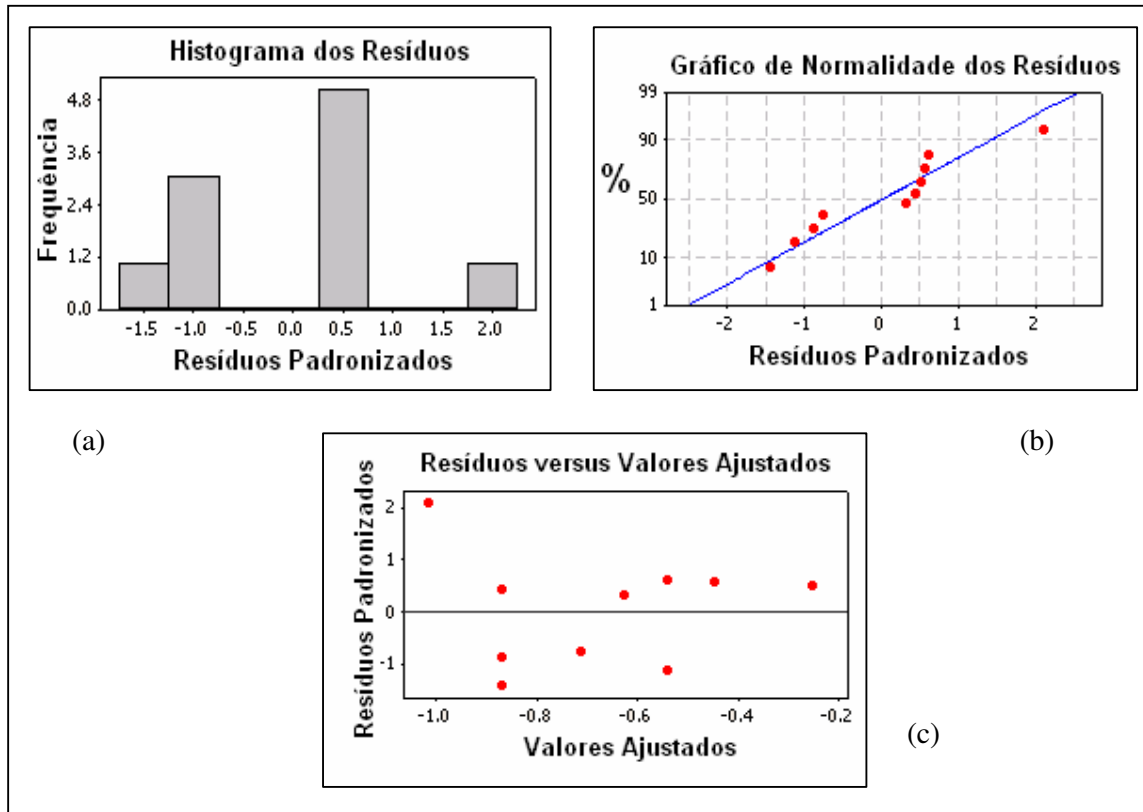


Figura 53 – Gráficos dos resíduos padronizados do modelo para TSS do conjunto 2 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados

Tabela 25 – Análise dos resíduos

Histograma dos resíduos	Teste de normalidade Anderson-Darling a 5% significância	Análise de variância
normal	normal (A.D. = 0,481 e p-valor = 0,178)	constante

Observa-se na Figura 53 e Tabela 25 que as análises dos resíduos do modelo demonstram a normalidade e variância constante, sendo o modelo indicado para inferência de TSS para o conjunto 2. Na Tabela 26 são apresentados os resultados da validação com a aplicação do método adaptado “*jackknife*” ao modelo.

Tabela 26 – Intervalo de predição (IP) para Log(TSS) a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”

Elemento amostral excluído	Modelos de Validação $\text{Log(TSS)} = \beta_0 - \beta_1 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	Log(Prof. Secchi)	Log(TSS) – real (m)	Limite inferior IP	Limite superior IP
1	$\text{Log(TSS)} = 0,5292 - 1,397 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,3424	-0,76955	-1,0465	0,0390
2	$\text{Log(TSS)} = 0,5606 - 1,488 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,3617	-0,56067	-1,2134	-0,0572
3	$\text{Log(TSS)} = 0,5718 - 1,543 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,4149	-0,78252	-1,4871	-0,2883
4	$\text{Log(TSS)} = 0,4213 - 1,150 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,4470	-0,63827	-1,6499	-0,7566
5	$\text{Log(TSS)} = 0,5492 - 1,482 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,4150	-1,04576	-1,4071	-0,2558
6	$\text{Log(TSS)} = 0,5636 - 1,488 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,3424	-0,41454	-1,1377	0,0185
7	$\text{Log(TSS)} = 0,7277 - 1,893 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,2787	-0,16749	-1,0565	0,4139
8	$\text{Log(TSS)} = 0,4976 - 1,343 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,4149	-1,15490	-1,3297	-0,2865
9	$\text{Log(TSS)} = 0,5918 - 1,555 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,3220	-0,33724	-1,0801	0,1276
10	$\text{Log(TSS)} = 0,5398 - 1,441 * \text{Log(Prof. Secchi)}$	0,3802	-0,86967	-1,2529	-0,1337

Na Tabela 26 verifica-se que os valores reais do logaritmo de Sólidos em Suspensão - Log(TSS) para todos os elementos amostrais, com exceção do ponto 4, estão incluídos nos Intervalos de Predição (IP) para os modelos. O ponto 4, embora não esteja dentro do intervalo, apresenta valor muito próximo do limite inferior, podendo ser aceito. Para uma aceitação mais robusta do modelo original, aplicou-se a análise dos coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  de cada modelo de validação, observando se tais coeficientes pertencem ao Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, considerando  $\alpha = 5\%$ . Sendo os intervalos de confiança  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , expressos por  $-0,1952276 < \beta_0 < 2,2242276$  e  $-7,762788 < \beta_1 < -1,315212$ , verificou-se que todos os coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  dos modelos de validação encontram-se dentro do Intervalo de Confiança (IC) do modelo original.

Portanto, aceita-se o modelo original, ou seja, a hipótese de validade do modelo de regressão gerado a partir do logaritmo de Sólidos em Suspensão - Log(TSS) a partir da variável logaritmo da Profundidade de Secchi é confirmada.

Os modelos empíricos gerados no Minitab pelo método “*Best Subsets*” para inferência de Turbidez nos pontos pertencentes ao conjunto 2 ( $n = 10$ ), após testes realizados entre todas as variáveis correlacionadas e estatisticamente significativas, conforme apresentado em 7.4, são observados na Tabela 27. O teste formal de Normalidade Anderson-Darling da variável dependente Turbidez foi aplicado, e o resultado mostrou que a variável é normal (A.D. = 0,361 e p-valor = 0,370) ao nível de significância de 5%.



Tabela 27 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “Best Subsets” para Turbidez conjunto 2

Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp	$\sigma^2$	Log (Prof. Secchi)	Log (Cond. Elétrica)	Log (571-698)	Log (571-696)	Log(568-648)	Log(574-584)
1	38,2	4	0,162						X
1	30,9	5,2	0,172			X			
2	59,2	1,8	0,132	X		X			
2	56	2,2	0,137			X	X		
<b>3</b>	<b>71,4</b>	<b>1,5</b>	<b>0,110</b>	X	X	X			
3	66,7	2	0,119	X	X		X		
4	69,8	3,1	0,113	X	X	X	X		
4	69	3,1	0,115	X	X	X			X
5	62,9	5	0,126	X	X	X	X		X
5	62,4	5	0,126	X	X	X	X	X	
6	50,6	7	0,145	X	X	X	X	X	X

As exigências estatísticas para a escolha do melhor modelo dentre aqueles apresentados na Tabela 27 foram analisadas (menor número de variáveis envolvidas na construção do modelo, desde que ele apresente o maior coeficiente de determinação ajustado - R<sup>2</sup> ajustado, estatística Cp\_Mallows ~ p e  $\sigma^2$  pequeno). Assim, o modelo escolhido foi aquele que relaciona 3 variáveis independentes: Log (Prof. Secchi), Log (Condutividade Elétrica) e Log (571 – 698), com R<sup>2</sup> ajustado explicando 71,4% da variabilidade dos dados,  $\sigma^2$  pequeno em relação aos demais e Cp\_Mallows baixo (1,5) comparando-o com p = 4 (3 variáveis independentes + 1 variável dependente), mas aceitável.

O resultado da aplicação da análise de regressão é apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 – Análise de Regressão

Coefficientes estimados	p-valor	VIF	p-valor sem constante
Constante	0,086		
Log (prof. Secchi)	0,012	2,3	0,042
Log (Condutividade)	0,093	2,7	0,067
Log (571-698)	0,005	2,4	0,010

O p-valor obtido na análise da variância (0,014) mostra que o modelo estimado é significativo a 5%. Os p-valores apresentados na Tabela 28 para os coeficientes estimados, indicam que há significância no relacionamento com Turbidez apenas para as variáveis Log (Prof. Secchi), com p-valor = 0,012 e para Log (571-698), com p-valor = 0,005, a 5% de significância. Os valores de VIF, próximos de 3 para as três variáveis, indicam que o modelo pode ser considerado aceitável. Ainda na Tabela 28, avaliando o modelo sem a



constante, verifica-se que a variável independente Log (Condutividade) não apresentou p-valor significativo a 5%, não havendo possibilidade de melhora do modelo.

Portanto, o modelo para inferência de turbidez para o conjunto 2, com  $n = 10$  é definido pela seguinte equação (9):

$$\text{Log(Turbidez)} = - 1,16 - 2,29*\text{Log(Prof. Secchi)} - 1,15*\text{Log}(571-698) \quad (9)$$

A análise de regressão múltipla aplicada à variável resposta Turbidez com uso das variáveis preditivas Log (TSS) e Log (571-698) pode ser observada na Tabela 29.

Tabela 29 – Análise de Regressão para o modelo final

<b>Coefficientes estimados</b>	<b>p-valor</b>	<b>VIF</b>
<b>Constante</b>	0,061	
<b>Log (prof. Secchi)</b>	0,037	1,1
<b>Log (571-698)</b>	0,009	1,1

Na Tabela 29 verifica-se que os p-valores das variáveis preditivas são significativos a 5%, e os VIF's representam baixa correlação entre as variáveis do modelo. O  $R^2$  ajustado indicou que as variáveis preditivas explicam 59,2% da variância em Turbidez para o conjunto 2, sendo o p-valor da variância do modelo estimado de 0,018, significativo a 5%. Portanto, o modelo gerado é apropriado.

Os gráficos dos resíduos do modelo para Turbidez são apresentados na Figura 54 e suas análises na Tabela 30.



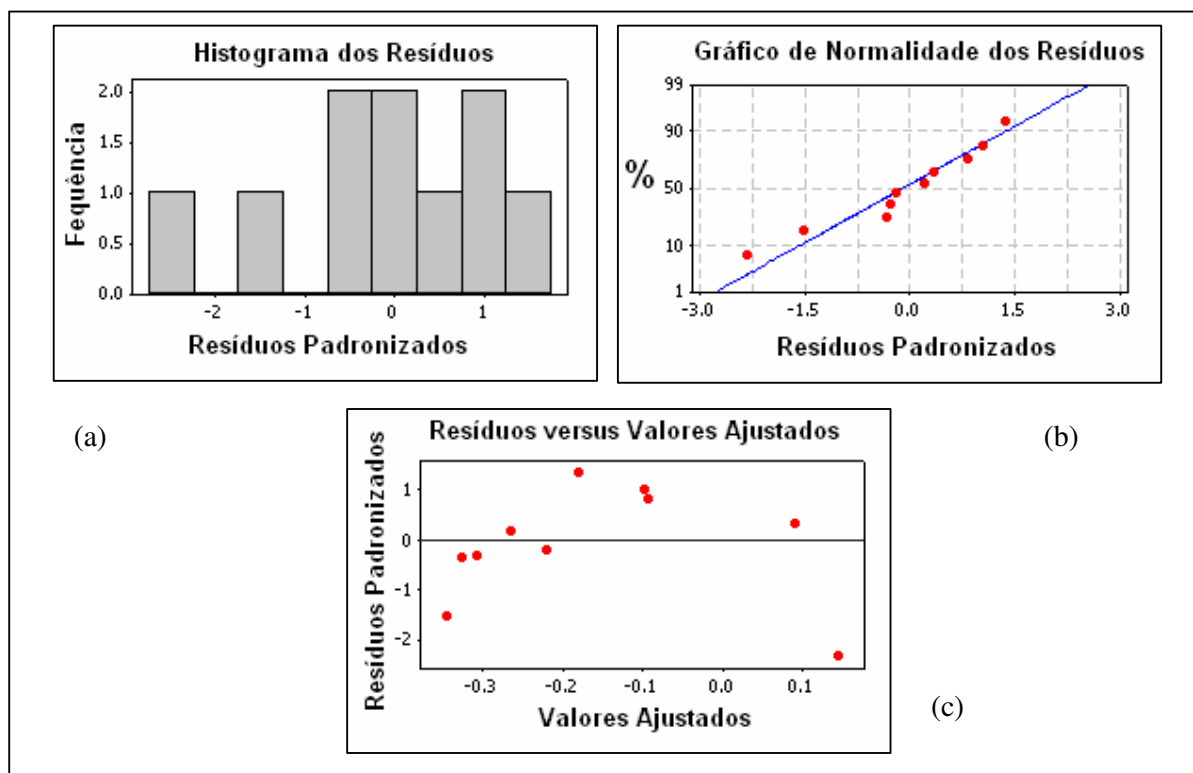


Figura 54 – Gráficos dos resíduos do modelo para Turbidez do conjunto 2 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados

Tabela 30 – Análise dos resíduos

Histograma dos resíduos	Teste de normalidade Anderson-Darling a 5% significância	Análise de variância
normal	normal (A.D. = 0,250 e p-valor = 0,664)	constante

Analisando-se a Figura 54 e a Tabela 30, verifica-se que análises dos resíduos do modelo demonstram a normalidade e variância constante, sendo o modelo indicado para inferência de Turbidez do conjunto 2.

Sabendo-se que os principais responsáveis pela turbidez da água são principalmente as partículas suspensas, como bactérias, fitoplâncton e detritos orgânicos e inorgânicos presentes na água, e em menor proporção, os compostos dissolvidos, que são responsáveis pela cor da água, pode-se considerar, de um modo geral, que a cor aparente da água indica sua turbidez (ESTEVEZ, 1998). Isso leva a conclusão de que, no reservatório em

estudo, as partículas suspensas como fitoplâncton e detritos também estão presentes em baixas concentrações, o que pôde ser percebido na cor praticamente transparente da água durante os trabalhos de campo. Esse fato pode justificar a dificuldade em modelar essa variável no reservatório, representada pelo valor do coeficiente de correlação ajustado ( $R^2$  ajustado = 59,2%). Sabo et al. (2008), estudando o mesmo reservatório, concluiu que a turbidez não é um problema em Itupararanga, assim como também não existem áreas críticas de erosão no seu entorno. A distribuição espacial da turbidez nesse reservatório pode ser resultado da atuação de outras variáveis, como declividade, tipos de solo, cobertura do solo, morfologia da área de estudo (profundidade e atuação do vento).

Na Tabela 31 são apresentados os resultados da validação com a aplicação do método adaptado “jackknife” ao modelo.

Tabela 31 – Intervalo de predição (IP) para Turbidez a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”

Elemento amostral excluído	Modelos de Validação $\text{Log}(\text{Turbidez}) = -\beta_0 - \beta_1 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - \beta_2 * \text{Log}(571-698)$	Log(Prof.S ecchi)	Log(571- 698)	Log(Turbid ez)– real (m)	Limite inferior IP	Limite superior IP
1	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,1985 - 2,2774 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,1692 * \text{Log}(571-698)$	0,3424	-1,4584	-0,244125	-0,6695	0,1230
2	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,1442 - 2,2161 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,1159 * \text{Log}(571-698)$	0,362	-1,65	0,008600	-0,4603	0,2462
3	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,1464 - 2,174 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,1180 * \text{Log}(571-698)$	0,415	-1,55	-0,366532	-0,7084	0,0810
4	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,2724 - 1,3901 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,0278 * \text{Log}(571-698)$	0,447	-1,60	-0,508638	-0,6088	0,1056
5	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,1705 - 2,241 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,1470 * \text{Log}(571-698)$	0,415	-1,64	-0,244125	-0,5985	0,1688
6	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,1552 - 2,2937 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,1478 * \text{Log}(571-698)$	0,342	-1,53	-0,013228	-0,5160	0,1543
7	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,0057 - 4,6392 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,6279 * \text{Log}(571-698)$	0,279	-1,69	-0,045757	0,1890	0,7166
8	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -0,9840 - 2,3188 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,0431 * \text{Log}(571-698)$	0,415	-1,91	0,117271	-0,4899	0,5897
9	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,0431 - 2,3485 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,0940 * \text{Log}(571-698)$	0,322	-1,38	-0,337242	-0,7336	0,1599
10	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,0825 - 2,2948 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,0938 * \text{Log}(571-698)$	0,380	-1,68	0,029384	-0,4608	0,2265



Na Tabela 31 observa-se que os valores reais de Log(Turbidez) para todos os elementos amostrais apresentam-se incluídos nos Intervalos de Predição (IP) dos modelos, com exceção do ponto 7, que apresenta valor próximo do limite inferior, podendo ser aceito. Para uma aceitação mais robusta do modelo original, aplicou-se a análise dos coeficientes  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  de cada modelo de validação, observando se tais coeficientes pertencem ao Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, considerando  $\alpha = 5\%$ . Sendo os intervalos de confiança  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  expressos por  $2,3790875 < \beta_0 < 0,0686875$ ;  $-4,411321 < \beta_1 < -0,176079$  e  $-1,9046 < \beta_2 < -0,391$ , verificou-se que todos os coeficientes  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  dos modelos de validação encontram-se dentro do Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, com exceção do coeficiente  $\beta_1$  para o ponto 7, que encontra-se muito próximo ao limite inferior do modelo, sendo considerado aceitável.

Portanto, aceita-se o modelo original, ou seja, a hipótese de validade do modelo de regressão gerado para o logaritmo da Turbidez a partir das variáveis: logaritmo da Profundidade de Secchi e logaritmo da diferença de bandas (571-698) é confirmada.

## 8.2 Modelo Empírico para Inferência de Condutividade Elétrica e Profundidade de Secchi para o Conjunto 3 (céu nublado e vento fraco)

Dos testes realizados para construção do modelo de regressão múltipla para inferência de Condutividade Elétrica, nos 11 pontos pertencentes ao conjunto 3, aqueles que apresentaram melhores resultados são mostrados na Tabela 32. O teste formal de Normalidade Anderson-Darling da variável dependente Condutividade Elétrica, resultou positivo para normalidade (A.D. = 0,256 e p-valor = 0,651), ao nível de confiança de 5%.

Tabela 32 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “Best Subsets” para Condutividade Elétrica, Conjunto 3

Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp_Mallows	$\sigma^2$	Assimetria RC	B1 Ikonos	B2 Ikonos	B3 Ikonos	B4 Ikonos
1	61,3	3,5	0,216	X				
1	31,8	0,8	0,286		X			
2	59,7	1,7	0,220	X	X			
2	58,5	1,6	0,223	X				X
3	65,6	0,6	0,203	X			X	X
3	65,5	0,6	0,204	X	X	X		



As exigências estatísticas para modelos de regressão foram todas observadas no modelo que envolve duas variáveis independentes: Assimetria e B1 do Ikonos, com  $R^2$  ajustado explicando 59,7% da variabilidade dos dados,  $\sigma^2$  menor em relação aos demais e Cp\_Mallows adequado com  $Cp = 1,7 \sim p = 3$  (2 variáveis independentes + 1 variável dependente).

O resultado da aplicação da análise de regressão é apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 – Análise de Regressão

<b>Coefficientes estimados</b>	<b>p-valor</b>	<b>VIF</b>	<b>p-valor sem constante</b>
<b>constante</b>	0		
<b>Assimetria RC</b>	0,028	1,6	0
<b>B1_Ikonos</b>	0,448	1,6	0,001

O p-valor resultante da análise de variância da regressão (0,011) demonstra que os modelo estimado é significativo a 5% de confiança. Os p-valores observados na Tabela 33 mostram que somente a assimetria do contínuo removido é significativamente relacionada com a Condutividade elétrica para o conjunto 3, pois apresenta p-valor = 0,028 contra o p-valor de 0,448 da B1\_Ikonos. Os valores de VIF para as duas variáveis indicam baixa correlação.

Analisando o modelo sem a constante, verifica-se que o p-valor da variável B1\_Ikonos torna-se significativo a 5%. Portanto, as estatísticas indicam que o modelo mais adequado deve usar como variáveis explicativas independentes tanto a assimetria do contínuo removido quanto a B1\_Ikonos, sem a constante. Porém, após a aplicação do modelo, verificou-se que os resíduos são autocorrelacionados (não normalidade dos resíduos – teste Durbin-Watson), o que não permite a aprovação do modelo em relação a esse teste. Portanto, optou-se em trabalhar com o modelo que inclui a constante (Tabela 33), sendo tomada como variável independente apenas a assimetria do contínuo removido. O modelo com a constante ficou definido pela seguinte equação:

$$\text{Condutividade Elétrica} = 82,9 + 2,25 * \text{Assimetria RC} \quad (10)$$



O modelo estimado apresentou um coeficiente de determinação ajustado bom, com 61,3% da variabilidade de Condutividade elétrica sendo explicada pela variável explicativa Assimetria RC e p-valor significativo a 5% de confiança (0,003).

Os gráficos dos resíduos do modelo para Condutividade Elétrica são apresentados na Figura 55 e as análises na Tabela 35.

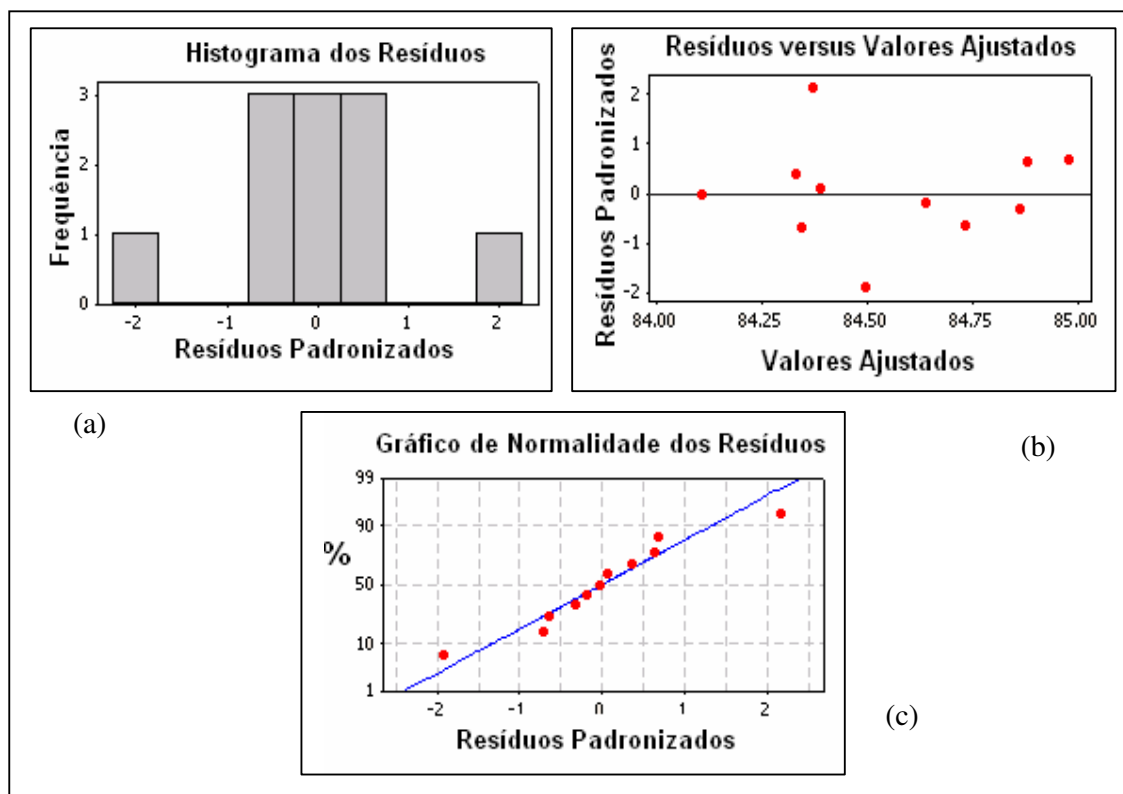


Figura 55 - Gráficos dos resíduos do modelo para Condutividade Elétrica do conjunto 3 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados

Tabela 34 – Análise dos resíduos

Histograma dos resíduos	Teste de normalidade Anderson-Darling a 5% significância	Análise de variância
normal	normal (A.D. = 0,362 e p-valor = 0,375)	constante

Analisando-se a Figura 55 e a Tabela 34 observa-se os resíduos do modelo demonstram a normalidade e variância constante, sendo o modelo indicado para inferência de Condutividade Elétrica do conjunto 3.

A validação do modelo de regressão foi realizada pela adaptação do método de múltiplas subamostras ou “jackknife”, conforme descrito no início deste capítulo.

A Tabela 35 apresenta o intervalo de predição (IP) na estimativa de Condutividade Elétrica para os modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.

Tabela 35 – Intervalos de predição para Condutividade Elétrica a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”

Elemento amostral excluído	Modelos de Validação Cond.El. = $\beta_0 + \beta_1$ *(Assimetria)	(Assimetria)	Cond. El. – real ( $\mu\text{S/cm}$ )	Limite inferior IP	Limite superior IP
1	Cond.El. = 82,8903 + 2,3189*(Assim.)	0,857	84,8	84,2858	85,4694
2	Cond.El. = 82,8928 + 2,3242*(Assim.)	0,798	84,6	84,1937	85,3014
3	Cond.El. = 83,0261 + 2,1757*(Assim.)	0,694	84,1	84,1085	84,9636
4	Cond.El. = 83,0723 + 2,0340*(Assim.)	0,909	85,1	84,2971	85,5454
5	Cond.El. = 83,0205 + 2,1495*(Assim.)	0,626	84,2	83,8091	84,9230
6	Cond.El. = 82,9243 + 2,2597*(Assim.)	0,645	84,4	83,8157	84,9478
7	Cond.El. = 82,8826 + 2,3086*(Assim.)	0,619	84,4	83,7400	84,8833
8	Cond.El. = 82,6915 + 2,5216*(Assim.)	0,637	84,8	83,9028	84,6928
9	Cond.El. = 82,9288 + 2,2610*(Assim.)	0,758	84,6	84,0864	85,1990
10	Cond.El. = 83,0225 + 2,1060*(Assim.)	0,865	85	84,2571	85,4313
11	Cond.El. = 82,9367 + 2,2453*(Assim.)	0,520	84,1	83,4481	84,7604

Na Tabela 35 verifica-se que os valores reais de Condutividade Elétrica para todos os elementos amostrais apresentam-se incluídos nos Intervalos de Predição (IP) dos modelos. Para uma aceitação mais robusta do modelo original, aplicou-se a análise dos coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  de cada modelo de validação, observando se tais coeficientes pertencem ao Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, considerando  $\alpha = 5\%$ . Sendo os intervalos de confiança  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , expressos por  $82,0257904 < \beta_0 < 83,8390096$  e  $1,0096406 < \beta_1 < 3,4919594$ , verificou-se que todos os coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  dos modelos de validação encontram-se dentro do Intervalo de Confiança (IC) do modelo original.

Portanto, aceita-se o modelo original, ou seja, a hipótese de validade do modelo



de regressão gerado a partir da Assimetria do contínuo removido em relação à Condutividade Elétrica é confirmada.

Analisando o modelo, verifica-se que a relação estabelecida entre as variáveis indica que a quantidade total de material ionizado na água do reservatório (Condutividade Elétrica) está sendo modelada pela assimetria<sup>1</sup> no estreito intervalo de 580 a 628 nm. O grau de assimetria verificado para os pontos do conjunto 3 (<1) indicam que ocorreu um deslocamento para comprimentos de onda menores do que o  $\lambda$  de referência, conforme o aumento da condutividade elétrica ( $r = 0,72$ ;  $p$ -valor = 0,008).

A Condutividade Elétrica, assim como vários outros indicadores físicos, químicos e biológicos, é apontada por diversos autores, dentre eles Esteves (1988) e Van Nieuwenhuysse & Jones (1996) como importante na estimativa da variância residual dos modelos preditivos de clorofila *a*. A interação de alguns desses fatores, incluindo a Condutividade Elétrica, foi considerada na predição de clorofila *a* na planície de inundação do alto rio Paraná por Rocha (2003), que considerou o bicarbonato (elemento estimulador das taxas fotossintéticas) como um dos principais íons associados à presença de clorofila *a*.

O modelo escrito para Condutividade Elétrica nesta pesquisa pode estar associado à presença de clorofila *a* no reservatório de Itupararanga, uma vez que os nutrientes provenientes das margens da represa, onde foi constatada ocorrência considerável de culturas agrícolas, como pode ser observado no mapa de cobertura do solo no entorno do reservatório de Itupararanga (Figura 9, Capítulo 4), podem estar sendo carregados através das chuvas, aumentando a Condutividade Elétrica (valor médio para o reservatório de Itupararanga foi de 84  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , considerado alto quando comparado com os dados obtidos por Rocha (2003), no alto rio Paraná, onde a Condutividade variou de 47 a 62  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no rio Paraná; de 46 a 61  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na lagoa das Garças; de 23 a 49  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no rio Baía e de 21 a 52  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na lagoa Carão; e com dados obtidos por Dias et al. (2007) na represa de Paraibuna/SP que estão entre 29 e 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . O aumento da condutividade elétrica pode ser um indicativo do aumento da disponibilidade de nutrientes na coluna d'água, influenciando de forma direta a biomassa fitoplanctônica, e portanto na clorofila *a*.

A partir de experimentos relatados por Bukata et al. (1995) em centenas de lagos e reservatórios na América do Norte, Europa, Ásia, Austrália e países da América

---

<sup>1</sup> A assimetria do contínuo removido é a razão da soma dos canais à direita do  $\lambda$  de referência pela soma dos canais à esquerda, ou seja, a partir de  $\lambda$  de referência, duas áreas são formadas sob a linha do contínuo, entre a profundidade e a largura de absorção.



Central e América do Sul, no período de 1960 a 1990, é possível associar o estado trófico das águas interiores com concentrações de fósforo, clorofila, oxigênio e transparência da água. Analisando-se rapidamente os dados do reservatório de Itupararanga segundo essa tabulação, pode-se associá-lo a um ambiente eutrófico, o que também é certificado por estudos de Esteves (1998). De um modo geral, baseando-se em Bukata et al. (1995), foi feita uma comparação dos dados do reservatório de Itupararanga e os do autor, traçando-se um indicativo de concentração de clorofila para o mesmo, baseando-se nos valores de transparência obtidos pela profundidade de Secchi observados nesta pesquisa e nos resultados obtidos por Ennes (2008) analisando a clorofila *a* em 8 pontos deste reservatório. Concluiu-se que a concentração de clorofila *a* no reservatório é baixa, entre 0,91 e 8,19  $\mu\text{g/l}$  (Ennes, 2008), sendo sua água clara, o que procede com o visualizado em campo e anteriormente discutido com relação aos sólidos em suspensão e turbidez (Capítulo 7).

Segundo Esteves (1998) a transparência obtida pela profundidade de Secchi também pode ser utilizada na estimativa indireta da zona eufótica, multiplicando-se o seu valor pelo fator 3 (constante para lagos e reservatórios do Brasil) (ISHII, 1987 apud ESTEVES, 1998). A média obtida para Itupararanga foi de 7,29 m, indicando a profundidade que atinge a radiação penetrando no corpo d'água, servindo de matéria-prima para o desenvolvimento das comunidades fitoplanctônicas neste reservatório. Esse valor é alto, o que pode influenciar no baixo crescimento dessas comunidades no reservatório.

Esses valores obtidos por comparação simples servem como um indicativo da existência de fitoplâncton no corpo d'água estudado, uma vez que análises mais precisas são inviáveis, devido à falta de dados sobre essa importante variável indicativa de qualidade da água. Não há aqui nenhuma intenção de estabelecer padrões a serem usados em outras pesquisas e trabalhos na área de estudo.

Alguns dos modelos de inferência de transparência da água a partir da Profundidade de Secchi, aplicados nos 11 pontos do conjunto 3, realizados pelo método *Best subsets* no Minitab, são apresentados na Tabela 36.



Tabela 36 – Análises de Regressão Múltipla pelo método “Best Subsets” para Profundidade de Secchi, Conjunto 3

Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp_Mallows	σ <sup>2</sup>	B4 Ikonos	B4/B1 Ikonos	B3/B1 Ikonos	(B2-B4)/(B2+B4) Ikonos	B4/B3 Ikonos
1	47,8	0,9	0,138		X			
1	45,8	0,6	0,141			X		
2	45,1	0,8	0,142		X			X
2	43,4	0,9	0,144	X	X			
3	38,4	2,6	0,150		X	X		X
3	38,0	2,7	0,151	X	X			X

O teste formal de Normalidade Anderson-Darling da variável dependente Profundidade de Secchi, resultou positivo para normalidade (A.D. = 0,316 e p-valor = 0,490), ao nível de confiança de 5%.

As exigências estatísticas para os modelos de regressão foram observadas no modelo que envolve apenas uma variável independente: a razão entre as bandas 4 e banda 1 do Ikonos, com R<sup>2</sup> ajustado explicando 47,8% da variabilidade dos dados, σ<sup>2</sup> menor em relação aos demais e Cp\_Mallows adequado com Cp = 0,9 ~ p = 1.

O resultado da aplicação da análise de regressão é apresentado na Tabela 37.

Tabela 37 – Análise de Regressão

Coefficientes estimados	p-valor
constante	0
B4/B1	0,011

O p-valor resultante da análise de variância da regressão (0,011) demonstra que os modelo estimado é significativo a 5%. O modelo ficou definido pela seguinte equação:

$$\text{Prof. Secchi} = 2,74 - 1,14*(B4/B1) \quad (11)$$

O modelo estimado apresentou um coeficiente de determinação ajustado bom, com 47,8% da variabilidade da transparência a partir da Profundidade de Secchi sendo explicada pela variável explicativa B4/B1 do Ikonos e p-valor significativo a 5% (0,011).



Os gráficos dos resíduos do modelo para Profundidade de Secchi são apresentados na Figura 56 e as análises na Tabela 38.

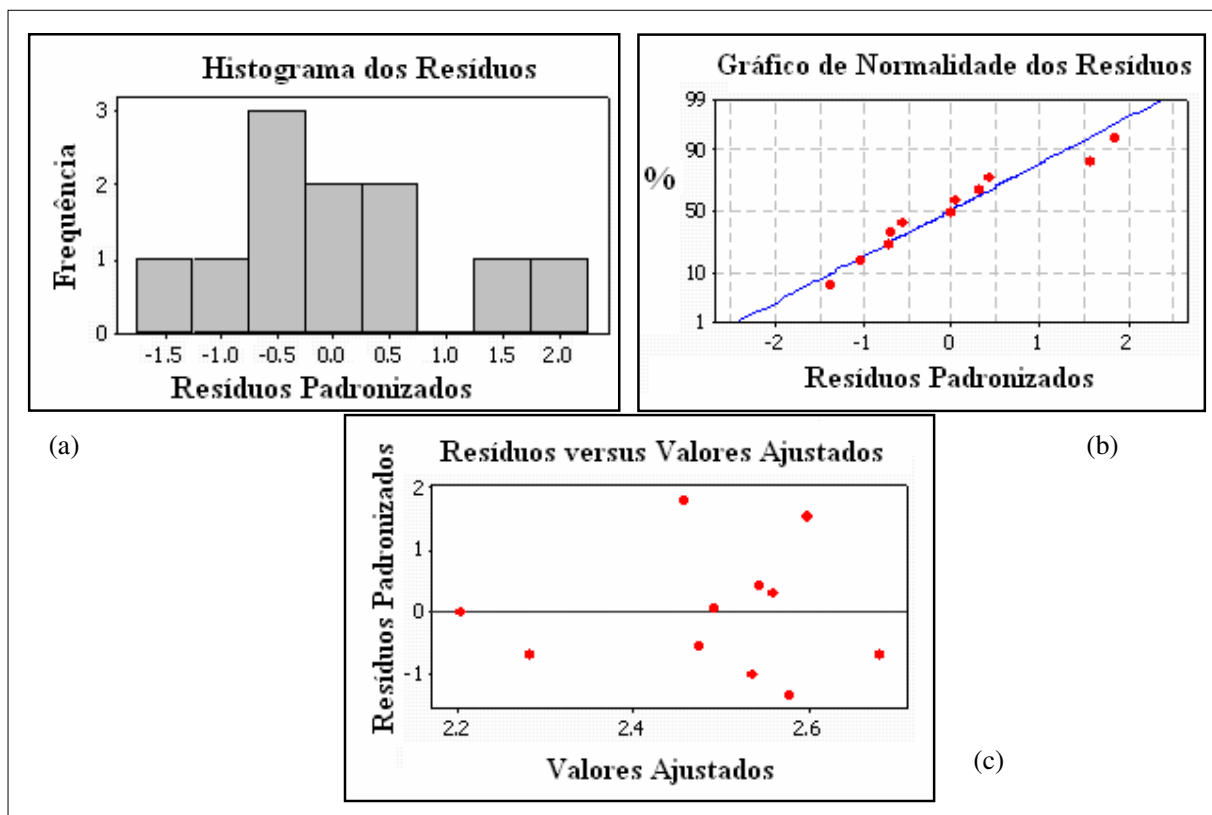


Figura 56- Gráficos dos resíduos do modelo para transparência a partir da Profundidade de Secchi do conjunto 3 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados

Tabela 38 – Análise dos resíduos

Histograma dos resíduos	Teste de normalidade Anderson-Darling a 5% significância	Análise de variância
normal	normal (A.D. = 0,350 e p-valor = 0,402)	constante

Analisando a Figura 56 e a Tabela 38 verifica-se que os resíduos do modelo demonstram a normalidade e variância constante, sendo o modelo indicado para inferência de transparência a partir da Profundidade de Secchi do conjunto 3.

A validação do modelo de regressão foi realizada pela adaptação do método de múltiplas subamostras conhecido por “jackknife”, conforme descrito no início deste capítulo.

A Tabela 39 apresenta o intervalo de predição (IP) na estimativa de Profundidade de Secchi para os modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.

Tabela 39 – Intervalos de predição para Profundidade de Secchi a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”

Elemento amostral excluído	Modelos de Validação Secchi = $\beta_0 - \beta_1 * (B4/B1)$	$\rho$ (B4/B1)	Secchi – real (m)	Limite inferior IP	Limite superior IP
1	Secchi = 2,7251 - 1,1227*(B4/B1)	0,167	2,6	2,1823	2,8926
2	Secchi = 2,7268 - 1,1236*(B4/B1)	0,154	2,6	2,1949	2,9122
3	Secchi = 2,7726 - 1,2694*(B4/B1)	0,046	2,6	2,3256	3,1025
4	Secchi = 2,6816 - 0,9935*(B4/B1)	0,120	2,8	2,2496	2,8758
5	Secchi = 2,7220 - 1,1959*(B4/B1)	0,244	2,7	2,1490	2,7122
6	Secchi = 2,7756 - 1,2452*(B4/B1)	0,138	2,4	2,2805	2,9275
7	Secchi = 2,7343 - 1,1420*(B4/B1)	0,212	2,5	2,1366	2,8484
8	Secchi = 2,7405 - 1,1338*(B4/B1)	0,229	2,4	2,1306	2,8309
9	Secchi = 2,7573 - 1,1821*(B4/B1)	0,174	2,4	2,2155	2,8876
10	Secchi = 2,7346 - 1,1397*(B4/B1)	0,468	2,2	1,7109	2,6918
11	Secchi = 2,7148 - 0,9984*(B4/B1)	0,399	2,2	1,9156	2,7168

Na Tabela 39 verifica-se que os valores reais de Profundidade de Secchi para todos os elementos amostrais apresentam-se incluídos nos Intervalos de Predição (IP) dos modelos. Aplicou-se a análise dos coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  de cada modelo de validação, para uma aceitação mais robusta do modelo original. Observou-se assim se tais coeficientes pertencem ao Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, considerando  $\alpha = 5\%$ . Sendo os intervalos de confiança  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , expressos por  $2,5426 < \beta_0 < 2,9373$  e  $0,3299 < \beta_1 < 1,9500$ , verificou-se que todos os coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  dos modelos de validação encontram-se dentro do Intervalo de Confiança (IC) do modelo original.

Portanto, aceita-se o modelo original, ou seja, a hipótese de validade do modelo de regressão gerado a partir da razão de bandas do Ikonos (B4/B1) em transparência da água a partir da variável Profundidade de Secchi é confirmada.



Analisando o modelo, verifica-se que a razão das bandas B4/B1 da imagem multiespectral Ikonos modelou as concentrações de profundidade de Secchi na água do reservatório de Itupararanga, embora esta variável ocorra em baixas concentrações. O modelo empírico descrito na equação (11), que relaciona Profundidade de Secchi e (B4/B1) foi aplicado à imagem Ikonos de fevereiro, utilizando-se o aplicativo Idrisi, e é apresentada na Figura 57.

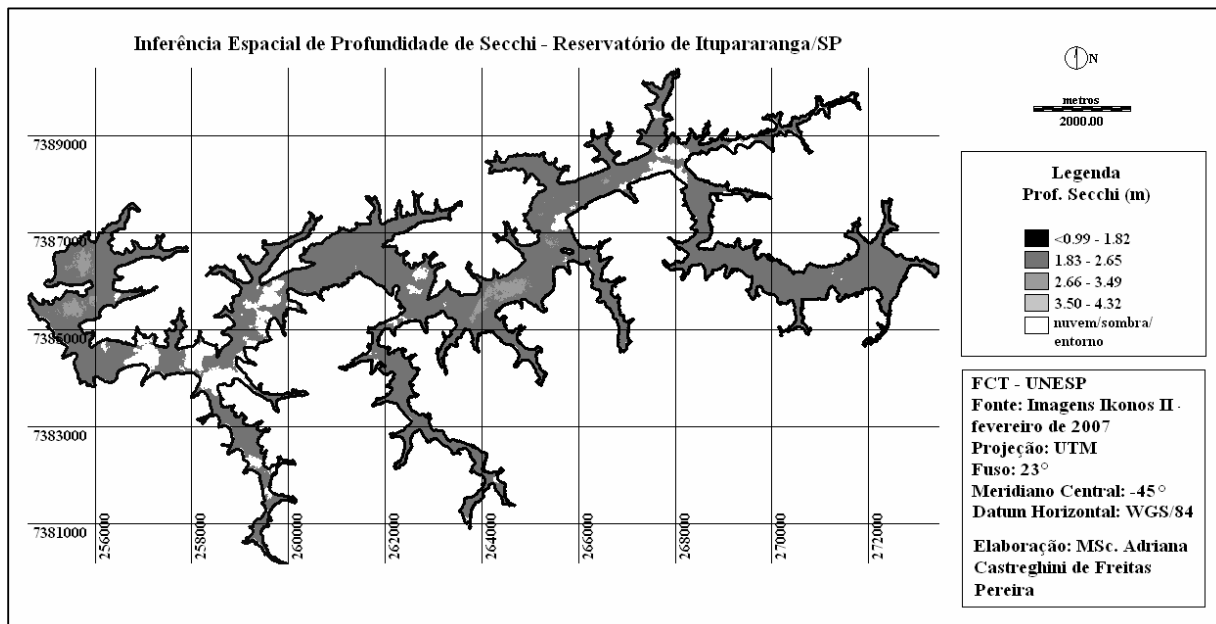


Figura 57 - Distribuição Espacial da concentração de Profundidade de Secchi, estimada a partir da razão de bandas B4 e B1 da imagem Ikonos de fevereiro de 2007 para o Reservatório de Itupararanga/SP

Analisando a distribuição espacial de Profundidade de Secchi, segundo sua variabilidade em concentração a partir do modelo matemático que usa as bandas B4 e B1 da imagem Ikonos de fevereiro de 2007 (Figura 57), pode-se verificar que essas concentrações apresentam valores muito homogêneos para todo o reservatório (entre 1,83 e 2,65 m), sendo que próximo à barragem (região oeste) e na região central do reservatório ocorrem valores um pouco mais altos de Secchi (maiores que 2,65 m). As amostras de campo (Tabelas 6 e 11, Capítulo 6) apresentaram valores de Secchi para os pontos pertencentes ao conjunto 3 que variaram entre 2 e 2,80m, sendo que os dois pontos com maiores valores de Secchi encontram-se exatamente na região da barragem do reservatório (ver Figura 36 e Tabela 11, Capítulo 6). Tais análises demonstram que o resultado da aplicação do modelo empírico é coerente com os valores de profundidade de Secchi e características do corpo d'água

observados em campo. Cabe ressaltar que as áreas em branco na imagem correspondem às regiões com presença de nuvens/sombras, que não fizeram parte da distribuição espacial do modelo empírico.

Este mesmo modelo foi também aplicado à imagem Ikonos de março de 2007, somente para a região oeste da imagem, disponível para a pesquisa, a partir do aplicativo Idrisi, e é apresentada na Figura 58.

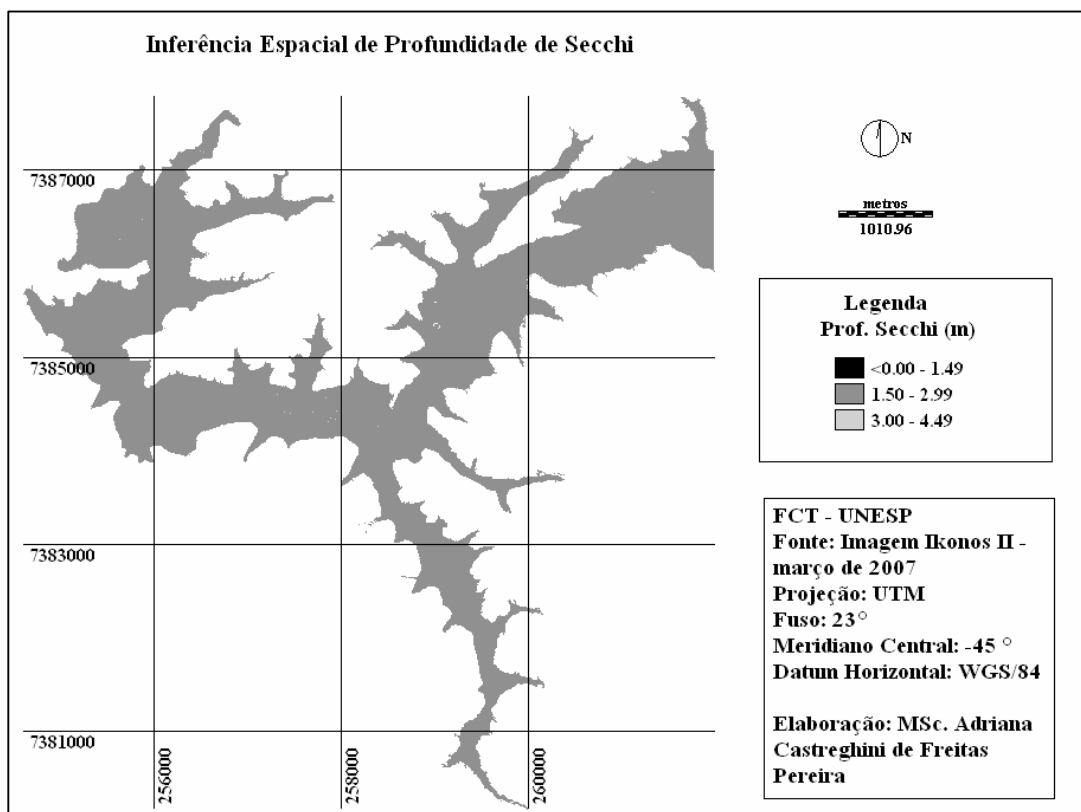


Figura 58 – Distribuição Espacial da concentração de Profundidade de Secchi estimada a partir da razão de bandas B4 e B1 da imagem Ikonos de março de 2007

Observa-se na Figura 58 que ocorre uma homogeneidade na concentração de profundidade de Secchi para a região analisada, com valores variando entre 1,50 e 2,99 m. As análises realizadas em campo apresentaram valores semelhantes, entre 2 e 2,80 m, conforme descrito anteriormente para a análise da Figura 57. Portanto, comparando-se as duas distribuições espaciais apresentadas nas Figuras 57 e 58, observa-se que os resultados são concordantes, visto que a região oeste do reservatório apresentou valores dentro do mesmo intervalo (entre 2,60 e 2,80 m), demonstrando que o modelo empírico é adequado.

### 8.3 Modelos Empíricos para Inferência de Sólidos em Suspensão (TSS) e Turbidez para o Conjunto 4 (céu nublado e vento médios a fortes)

Conforme apresentado no início deste capítulo, a construção de modelos de regressão para o conjunto 4 utilizou variáveis explicativas independentes diferentes, o que levou a geração de dois modelos de regressão para esse conjunto:  $(Y) = TSS$ , e  $(Y) = Turbidez$ , utilizando como variáveis independentes, respectivamente, as curvas espectrais com remoção do contínuo e as bandas da imagem multiespectral Ikonos de fevereiro de 2007; e razão de bandas da imagem multiespectral Ikonos.

Alguns dos modelos de inferência de sólidos em suspensão (TSS) aplicados nos 10 pontos do conjunto 4, realizados pelo método *Best Subsets* no Minitab, são apresentados na Tabela 40. O teste formal de Normalidade Anderson-Darling da variável dependente TSS (A.D. = 0,160 e p-valor = 0,924), ao nível de significância de 5%, apresentou distribuição normal.

Tabela 40 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “*Best Subsets*” para TSS  
Conjunto 4

Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp_Mallows	σ <sup>2</sup>	Profundidade RC	Largura RC	Assimetria RC	Área RC
1	59,1	-3,6	0,052		X		
1	17,7	-1,1	0,074				X
2	58,8	-1,9	0,052	X			X
2	58,5	-1,8	0,052		X		
<b>3</b>	<b>61,3</b>	<b>-0,3</b>	<b>0,050</b>		X		
3	55,4	4-0	0,054		X		
4	62,4	1,4	0,050		X		
<b>4</b>	<b>61,9</b>	<b>1,4</b>	<b>0,050</b>		X	X	
5	58,8	3,2	0,052	X	X	X	
5	58,8	3,2	0,052		X	X	X
6	50,6	5,1	0,057		X	X	X
6	50,5	5,1	0,057	X	X	X	
Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp_Mallows	σ <sup>2</sup>	B1	B2	B3	B4
2 continua	58,5	-1,8	0,052			X	
<b>3 continua</b>	<b>61,3</b>	<b>-0,3</b>	<b>0,050</b>			X	X
3 continua	55,4	-0	0,054		X		X
4 continua	62,4	1,4	0,050	X		X	X
<b>4 continua</b>	<b>61,9</b>	<b>1,4</b>	<b>0,050</b>			X	X
5 continua	58,8	3,2	0,052			X	X
5 continua	58,8	3,2	0,052			X	X
6 continua	50,6	5,1	0,057	X	X		X
6 continua	50,5	5,1	0,057	X	X		X



Todas as exigências estatísticas para a escolha do melhor modelo foram observadas, sendo escolhido o modelo com 2 variáveis independentes: Largura do contínuo removido e Banda 3 Ikonos, com  $R^2$  ajustado explicando 58,5% da variabilidade dos dados,  $\sigma^2$  pequeno em relação aos demais e  $Cp\_Mallows$  adequado com  $Cp = -1,8 \sim p = 3$  (2 variáveis independentes + 1 variável dependente). Porém, o resultado da aplicação da análise de regressão, apresentado na Tabela 41 demonstra que o modelo não é adequado, pois o p-valor da B3\_Ikonos não é significativo a 5% de confiança.

Tabela 41 – Análise de Regressão

Variáveis	p-valor	VIF	p-valor sem intercepto
Constante	0,003		
Largura RC	0,010	1	0,016
B3_Ikonos	0,280	1	0,258

O p-valor resultante da análise de variância do modelo de regressão estimado (0,019) apresentou-se significativo ao nível de confiança de 5% e o p-valor da Largura do contínuo (0,010) apresentado na Tabela 41, indica que esta é a única variável significativamente relacionada com o TSS para o conjunto 4, sendo mais apropriado o modelo que utiliza somente essa variável. Os valores de VIF indicam baixa correlação entre as variáveis. Avaliando o modelo sem a constante verifica-se que não ocorre melhoria do mesmo, permanecendo a variável B3\_Ikonos sem significância estatística.

Portanto, o modelo para inferência de TSS para o conjunto 4, com  $n = 10$  é definido pela seguinte equação:

$$TSS = 0,747 - 0,0192 * Largura Contínuo \quad (11)$$

A Figura 59 apresenta os gráficos dos resíduos para o modelo de TSS e a Tabela 42 as análises dos resíduos.



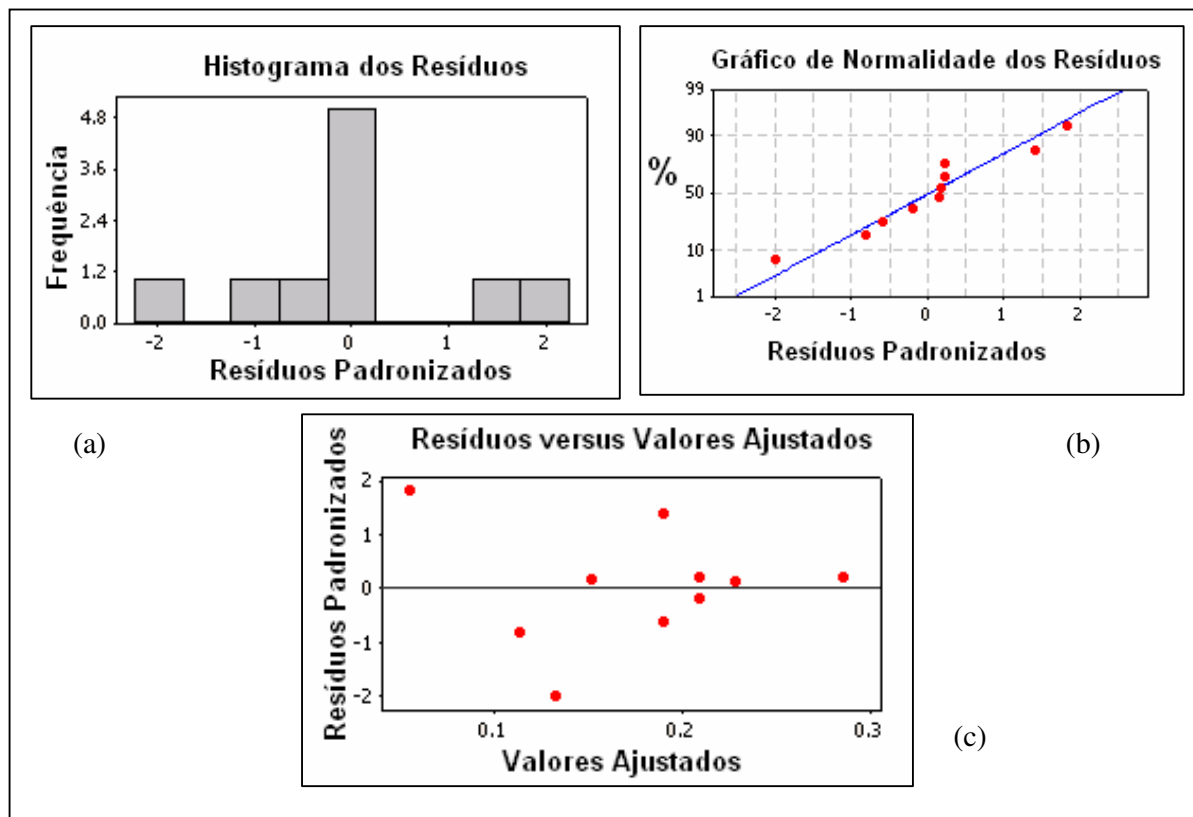


Figura 59: Gráficos dos resíduos do modelo para TSS do conjunto 4 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados

Tabela 42 – Análise dos resíduos

Histograma dos resíduos	Teste de normalidade Anderson-Darling a 5% significância	Análise de variância
normal	normal (A.D. = 0,410 e p-valor = 0,276)	constante

Na Figura 59 e Tabela 42 observa-se a normalidade dos resíduos e variância constante, sendo o modelo indicado para inferência de TSS para o conjunto 4.

Embora já tenha sido discutida a baixa concentração de sólidos em Suspensão presente no reservatório de Itupararanga, verifica-se nesse modelo que a variável está sendo detectada no estreito intervalo de 580 a 639 nm para o parâmetro largura do contínuo removido, além da banda 3 do Ikonos. Esse fato também foi observado por Ennes (2008) pesquisando o mesmo reservatório no intervalo de 589 a 640 nm, para a largura do contínuo removido, onde  $R^2 = 42,1\%$ . Vários autores, dentre eles Chen et al. (1992), Goodin

et al. (1993), Dekker (1993), Jensen (2000) e Ritchie et al.(2003), apresentam estudos relacionando a reflectância com diferentes concentrações de sólidos em suspensão, sendo observadas alterações na região entre 570 e 650 nm. Porém, um dos pontos negativos do modelo está no fato de que para sua aplicação são necessárias coletas de campo com espectroradiômetro, o que onera o trabalho, sendo portanto, contrário ao objetivo pré-estabelecido nesta pesquisa.

A Tabela 43 apresenta o intervalo de predição (IP) na estimativa de Sólidos em Suspensão - TSS para os modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”.

Tabela 43 – Intervalo de predição (IP) para TSS a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”

Elemento amostral excluído	Modelos de Validação TSS = $\beta_0 - \beta_1 * \text{Largura Contínuo Removido}$	Largura_CR	TSS – real (m)	Limite inferior IP	Limite superior IP
1	TSS = 0,7498 – 0,0193*Largura Contínuo Removido	31	0,160	0,0098	0,2910
2	TSS = 0,7403 – 0,01901*Largura Contínuo Removido	27	0,235	0,0818	0,3722
3	TSS = 0,7209 – 0,01838*Largura Contínuo Removido	24	0,295	0,1076	0,4519
4	TSS = 0,6835 – 0,01668*Largura Contínuo Removido	32	0,035	0,0487	0,2504
5	TSS = 0,7070 – 0,01769*Largura Contínuo Removido	33	0,075	-0,0193	0,2651
6	TSS = 0,7573 – 0,01944*Largura Contínuo Removido	29	0,160	0,0567	0,3302
7	TSS = 0,7534 – 0,01938*Largura Contínuo Removido	28	0,200	0,0690	0,3520
8	TSS = 0,74 – 0,01901*Largura Contínuo Removido	28	0,220	0,0662	0,3490
9	TSS = 0,7238 – 0,01869*Largura Contínuo Removido	29	0,260	0,0605	0,3030
10	TSS = 0,9749 – 0,02733*Largura Contínuo Removido	36	0,125	-0,1486	0,1303

Na Tabela 43 verifica-se que os valores reais de Sólidos em Suspensão (TSS) para todos os elementos amostrais, com exceção do ponto 4, apresentam-se incluídos nos Intervalos de Predição (IP) dos modelos. O Ponto 4, embora não esteja no intervalo, ficou muito próximo do limite inferior, sendo então considerado como aceitável. Para uma aceitação mais robusta do modelo original, aplicou-se a análise dos coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  de cada modelo de validação, observando se tais coeficientes pertencem ao Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, considerando  $\alpha = 5\%$ . Sendo os intervalos de confiança  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , expressos por  $0,3934596 < \beta_0 < 1,1009404$  e  $-0,03105831 < \beta_1 < -0,00737569$ , verificou-



se que todos os coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  dos modelos de validação encontram-se dentro do Intervalo de Confiança (IC) do modelo original. Portanto, aceita-se o modelo original, ou seja, a hipótese de validade do modelo de regressão gerado para Sólidos em Suspensão (TSS) a partir da variável Largura do Contínuo Removido é confirmada.

Vários testes foram realizados considerando todas as variáveis independentes que apresentaram correlação e significância estatística, para a inferência de Turbidez a partir das variáveis limnológicas e tratamentos nas curvas espectrais, normalizados com a função logarítmica. Alguns dos modelos gerados no Minitab (*Best Subsets*) são apresentados na Tabela 44.

O teste formal de Normalidade Anderson-Darling da variável dependente Turbidez foi aplicado obtendo resultado positivo para normalidade (A.D. = 0,200 e p-valor = 0,838), ao nível de confiança de 5%.

Tabela 44 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “*Best Subsets*” para Turbidez, Conjunto 4

Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp	$\sigma^2$	Log (Secchi)	Log (Cond)	Log (571/698)	Log (571/696)	Log (568/648)	Log (574/584)
1	73,1	3,7	0,161	X					
1	49,3	12,3	0,221		X				
<b>2</b>	<b>79,6</b>	<b>2,4</b>	<b>0,140</b>	X	X				
<b>2</b>	<b>71,1</b>	<b>5,1</b>	<b>0,167</b>	X		X			
3	87,2	1,5	0,111	X	X		X		
<b>3</b>	<b>86</b>	<b>1,8</b>	<b>0,116</b>	X	X	X			
4	85,7	3,2	0,117	X	X	X	X		
4	85,2	3,3	0,119	X	X		X	X	
5	83,3	5	0,127	X	X	X	X		X
5	83	5,1	0,128	X	X	X	X	X	
6	77,8	7	0,146	X	X	X	X	X	X

A escolha do melhor modelo neste caso foi definida não apenas pelo menor número de variáveis envolvidas na construção do modelo, mas também pela análise do fator de inflação da variável (VIF), pois ocorreu que os três modelos que aparentemente pareciam ser os mais adequados, apresentaram multicolinearidade entre as variáveis independentes, o que o torna inadequado.

Ainda assim, foram verificados para esses três modelos as exigências de maior R<sup>2</sup> ajustado,  $\sigma^2$  pequeno e Cp\_Mallows próximo a p. Essas estatísticas podem ser observadas na Tabela 44, para os modelos destacados em *itálico* e **negrito**.

Os resultados da análise de regressão são apresentados na Tabela 45 para os três modelos. O modelo 1 relaciona as variáveis independentes: Log(Profundidade de Secchi),



Log(Condutividade elétrica) e Log(571/698), com  $R^2$  ajustado = 86%. O modelo 2 trabalha com duas variáveis independentes: Log(Secchi) e Log(Condutividade elétrica), com  $R^2$  ajustado = 79,6%. Finalmente, o modelo 3 relaciona as duas variáveis independentes: Log(Secchi) e Log(571/698), com  $R^2$  ajustado = 71,1%.

Tabela 45 – Análises de Regressão dos três modelos selecionados aparentemente como adequados para inferência de Turbidez

	<b>Coefficientes estimados</b>	<b>p-valor</b>	<b>VIF</b>
<b>Modelo 1</b> <b>P = 0,002</b>	Log(Secchi)	0,004	10,4
	Log(Cond.)	0,027	12,3
	Log(571/698)	0,087	2,4
<b>Modelo 2</b> <b>P = 0,002</b>	Log(Secchi)	0,009	10,3
	Log(Cond.)	0,102	10,3
<b>Modelo 3</b> <b>P = 0,005</b>	Log(Secchi)	0,021	2,0
	Log(571/698)	0,524	2,0

Analisando-se a Tabela 45 verifica-se que os modelos 1 e 2 apresentam alta correlação entre as variáveis ( $VIF > 5$ ), o que os torna inadequados; o p-valor de ambos os modelos é significativo a 5% de confiança (0,002), e os p-valores dos coeficientes estimados demonstram que somente as variáveis Log(Secchi) e Log (Cond) são estatisticamente significativas, para o modelo 1 e somente Log (Secchi) para o modelo 2. O modelo 3, que apresentou melhores valores para VIF (2), e, portanto, mostrou-se adequado, resultou em p-valor da regressão significativo (0,005), sendo que a variável adequada e significativa a 5% foi o Log (Secchi), com p-valor = 0,021. Portanto, a partir dessas análises, pode-se verificar que o modelo 3 é o mais adequado para responder Turbidez. Porém, as análises dos resíduos para esse modelo (3) demonstram não normalidade dos mesmos, o que também é comprovado pelo teste formal de Normalidade Anderson-Darling, cujos valores foram: AD = 0,697; p-valor = 0,047, e pelos gráficos dos resíduos apresentados na Figura 60.



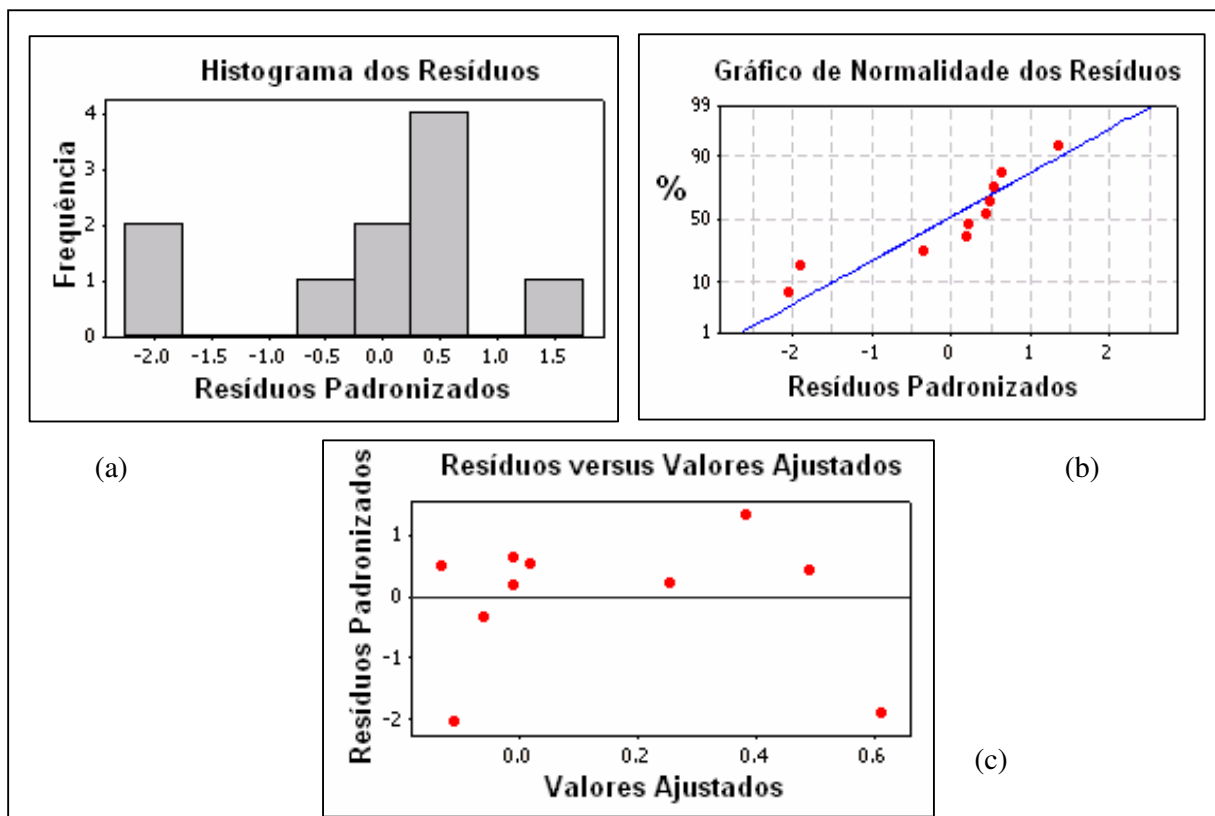


Figura 60 - Gráficos dos Resíduos do modelo 1 para Turbidez do conjunto 4 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados

A Tabela 46 apresenta as análises dos resíduos para o modelo.

Tabela 46 – Análise dos resíduos

Histograma dos resíduos	Teste de normalidade Anderson-Darling a 5% significância	Análise de variância
não normal	não normal (A.D. = 0,697 e p-valor = 0,047)	não constante

Na Figura 60 e Tabela 46 verifica-se a não normalidade dos resíduos e variância não constante, sendo o modelo não apropriado para inferência de Turbidez do conjunto 4. Os demais modelos apresentados na Tabela 45 não foram considerados, pois apresentaram valores altos de VIF ( $VIF > 5$ ), demonstrando multicolinearidade entre as variáveis.



O segundo modelo para inferência de Turbidez do conjunto 4 foi avaliado utilizando como variáveis independentes as bandas da imagem multiespectral Ikonos de fevereiro de 2007.

Para isso, vários testes foram realizados considerando todas as variáveis independentes que apresentaram correlação e significância estatística, nos 10 pontos pertencentes ao conjunto 4. Alguns desses modelos são apresentados na Tabela 47. O teste formal de Normalidade Anderson-Darling da variável dependente Turbidez foi aplicado, resultando em normalidade (A.D. = 0,555 e p-valor = 0,113), ao nível de significância de 5%.

Tabela 47 - Análises de Regressão Múltipla pelo método “Best Subsets” para Turbidez (segundo modelo), Conjunto 4, utilizando as bandas da imagem Ikonos

Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp_Mallows	$\sigma^2$	B1 Ikonos	B2 Ikonos	B3 Ikonos	B4 Ikonos
1	46,6	15,9	0,864			X	
1	40,2	18,5	0,914	X			
2	64	8,9	0,710		X	X	
2	53,4	12,7	0,807	X		X	
<b>3</b>	<b>82,4</b>	<b>3,4</b>	<b>0,496</b>		X	X	X
3	69,8	7,3	0,650	X		X	X
4	80,5	5	0,522	X	X	X	X
Var.	R <sup>2</sup> ajust	Cp_Mallows	$\sigma^2$	B3/B2	(B2-B3)/(B2+B3)	B3/B1	B2/B3
1	70,9	0,8	0,638	X			
1	69	1,2	0,658		X		
2	71,3	1,8	0,633	X		X	
2	68,5	2,4	0,663		X		X
3	71,3	3	0,634	X	X	X	
3	71,2	3	0,634	X		X	X
4	65,5	5	0,694	X	X	X	X

A escolha do melhor modelo dentre aqueles apresentados na Tabela 47 (destacado em *itálico e negrito*) levou em conta o menor número de variáveis envolvidas na sua construção, quais foram: B1, B3 e B4, obedecidas as seguintes exigências:

- Maior coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup> ajustado), que no caso foi de 82,4%;
- Cp\_Mallows ~ p, no caso Cp = 3,4 ~ p = 4 ;
- Menor  $\sigma^2$ , no caso 0,496, o menor de todos os modelos avaliados.

Porém, o valor do Fator de Inflação da Variação (VIF) para as variáveis envolvidas nesse modelo foi muito alto, demonstrando a alta correlação entre as bandas



originais do Ikonos (B1, B3 e B4), o que torna o modelo inadequado, como pode ser verificado na Tabela 48.

Tabela 48 - Fatores de Inflação da Variação (VIF) para o modelo de inferência de Turbidez (segundo modelo)

Variáveis	VIF
<b>B2</b>	113,1
<b>B3</b>	163,1
<b>B4</b>	18,9

Portanto, o modelo que apresentou uma única variável independente (B3/B2) e um ótimo valor do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado = 70,9%), com Cp considerado adequado (Cp = 0,8 para p = 2) e  $\sigma^2$  dentro da média dos valores de todos os modelos, foi considerado apropriado para a inferência de turbidez, cuja equação de regressão simples é apresentada a seguir:

$$Turbidez = -1,98 + 6,04*(B3/B2) \quad (12)$$

A aplicação da regressão simples apresentou p-valor = 0,001, ou seja, significativo a 5%. Os gráficos dos resíduos são apresentados na Figura 61 e na Tabela 49 tem-se as análises dos resíduos.



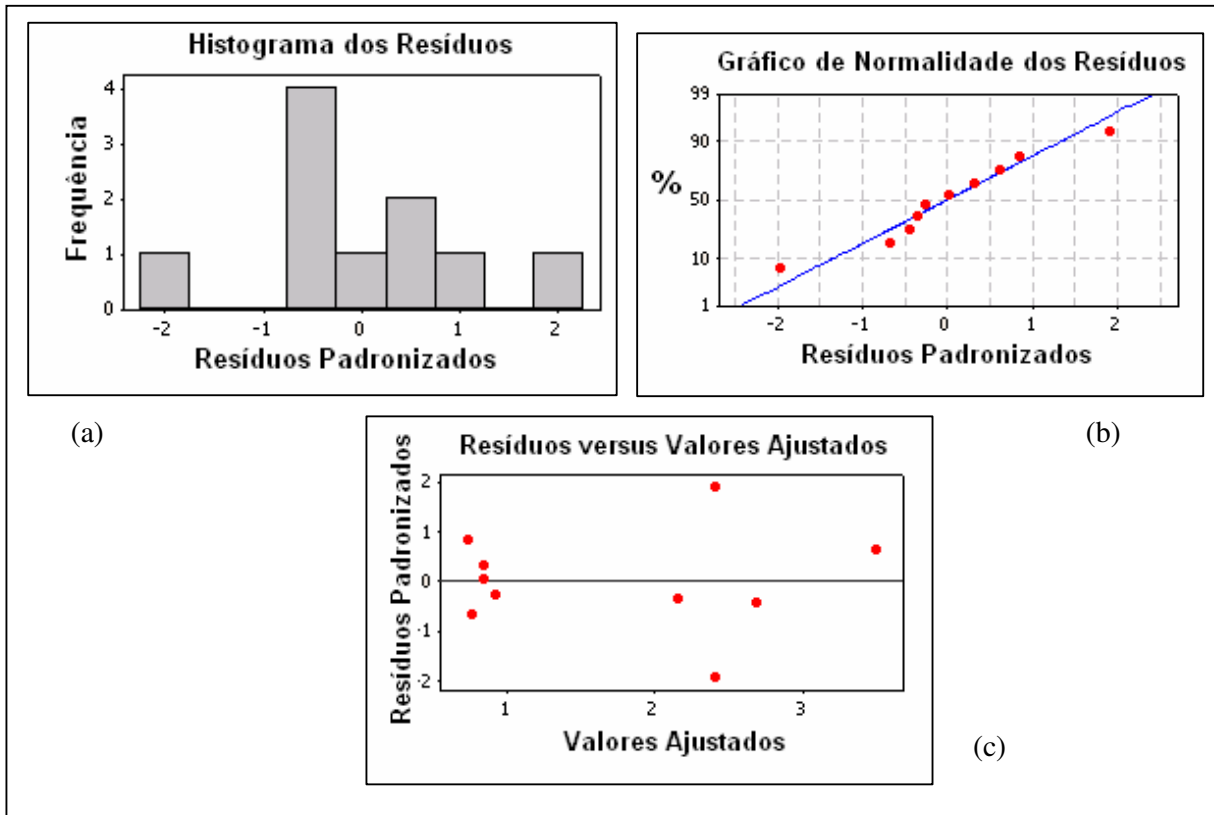


Figura 61 – Gráficos dos resíduos para Turbidez (modelo 2) do conjunto 4 – (a) histograma dos resíduos, (b) gráfico de Normalidade dos resíduos e (c) gráfico dos resíduos versus valores ajustados

Tabela 49 - Análise dos resíduos

Histograma dos resíduos	Teste de normalidade Anderson-Darling a 5% significância	Análise de variância
normal	normal (A.D. = 0,271 e p-valor = 0,590)	constante

A Figura 61 e a Tabela 49 demonstram a normalidade dos resíduos e variância constante, sendo o modelo indicado para inferência e Turbidez do conjunto 4.

A validação do modelo de regressão realizada pela adaptação do método “jackknife” é apresentada na Tabela 50.



Tabela 50 – Intervalos de Predição (IP) para Turbidez a partir dos modelos de validação com a aplicação do método adaptado “jackknife”

Elemento amostral excluído	Modelos de Validação Turbidez = $-\beta_0 + \beta_1 * (B3/B2)$	$\rho$ (B3/B2)	Turbidez – real (m)	Limite inferior IP	Limite superior IP
1	Turbidez = $-1,9872 + 6,058*(B3/B2)$	0,466	0,86	-0,951	2,623
2	Turbidez = $-1,9011 + 5,95*(B3/B2)$	0,479	0,77	-0,816	2,713
3	Turbidez = $-2,0827 + 6,179*(B3/B2)$	0,467	1,04	-0,970	2,576
4	Turbidez = $-2,2834 + 6,444*(B3/B2)$	0,448	1,22	-1,125	2,326
5	Turbidez = $-1,7501 + 5,752*(B3/B2)$	0,454	0,39	-0,893	2,614
6	Turbidez = $-2,2077 + 6,643*(B3/B2)$	0,726	1,26	1,348	3,879
7	Turbidez = $-1,9928 + 6,110*(B3/B2)$	0,683	1,94	0,474	3,887
8	Turbidez = $-1,6501 + 5,424*(B3/B2)$	0,907	3,81	1,170	5,374
9	Turbidez = $-2,0653 + 6,241*(B3/B2)$	0,771	2,43	0,968	4,528
10	Turbidez = $-1,7464 + 5,450*(B3/B2)$	0,726	3,55	0,933	3,500

Na Tabela 50 verifica-se que os valores reais de Turbidez para todos os elementos amostrais apresentam-se incluídos nos Intervalos de Predição (IP) dos modelos. Para uma aceitação mais robusta do modelo original, aplicou-se a análise dos coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  de cada modelo de validação, observando se tais coeficientes pertencem ao Intervalo de Confiança (IC) do modelo original, considerando  $\alpha = 5\%$ . Sendo os intervalos de confiança  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , expressos por  $-3,8238776 < \beta_0 < 2,01361224$  e  $3,127522 < \beta_1 < 8,952478$ , verificou-se que todos os coeficientes  $\beta_0$  e  $\beta_1$  dos modelos de validação encontram-se dentro do Intervalo de Confiança (IC) do modelo original.

Portanto, aceita-se o modelo original, ou seja, a hipótese de validade do modelo de regressão gerado a partir da razão de bandas do Ikonos (B3/B2) na inferência de Turbidez é confirmada.

A distribuição espacial do modelo empírico apresentado na equação (12), que relaciona (B3/B2) foi aplicado à imagem Ikonos de fevereiro, utilizando-se o aplicativo Idrisi, e é apresentada na Figura 62.



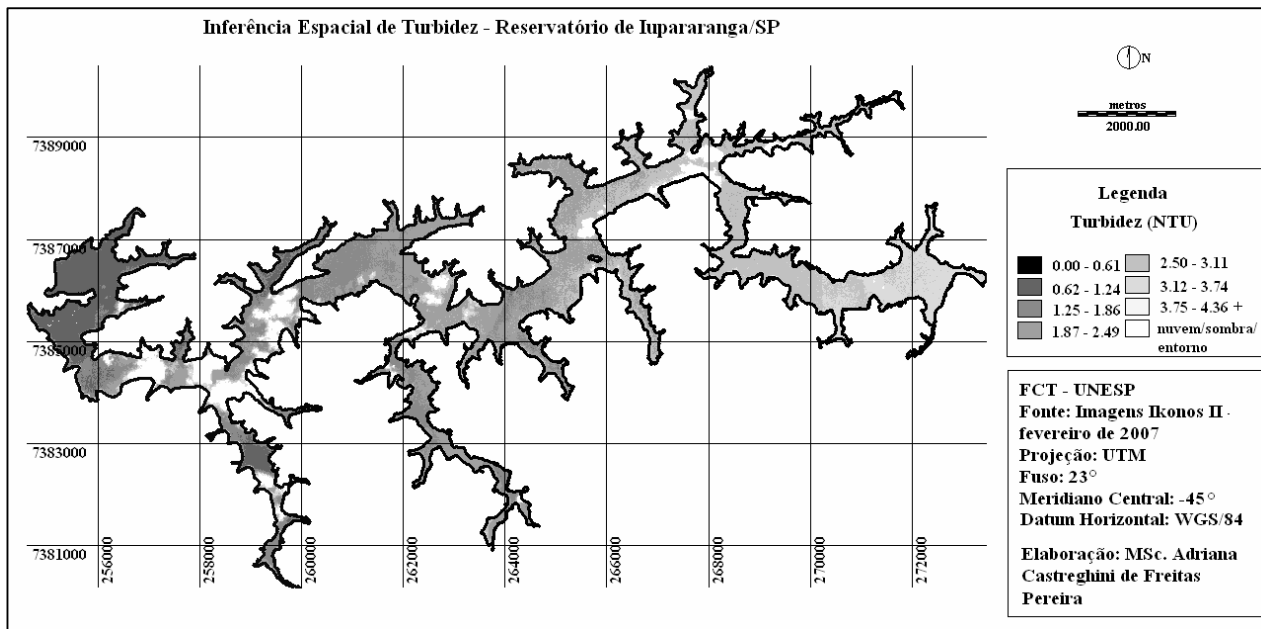


Figura 62 - Distribuição espacial da concentração de Turbidez estimada a partir da razão de bandas B3 e B2 da imagem Ikonos de fevereiro de 2007 para o Reservatório de Itupararanga/SP

Analisando a distribuição espacial de turbidez, apresentada na Figura 62, segundo sua variabilidade em concentração a partir do modelo matemático que usa as bandas B3 e B2 da imagem Ikonos de fevereiro de 2007, pode-se verificar que essas concentrações apresentam valores mais baixos (entre 0,62 e 1,24 NTU) próximos à barragem (região oeste) e entre 1,25 e 1,86 NTU na região central e nordeste do reservatório. Nessas regiões, o solo é coberto predominantemente por florestas ao norte e florestas misturadas a culturas, pastagens e solo exposto ao sul, onde se verifica área com construções de alto padrão (condomínios) (Figura 9, Capítulo 4). A região mais a leste do reservatório, próxima a foz do Rio Sorocaba (canto superior direito da imagem) apresenta concentrações de turbidez mais elevadas, entre 1,87 e 3,11 NTU. A cobertura do solo dessas regiões é predominantemente de floresta ao norte e cultura agrícola, pastagem e floresta ao sul. É provável que o tipo de cobertura do solo no entorno do reservatório de Itupararanga esteja contribuindo favoravelmente para as baixas concentrações de turbidez nesse corpo d'água. Essas análises demonstram que o resultado da aplicação do modelo empírico é coerente com os valores de turbidez (Apêndice A) e características do corpo d'água observados em campo.



O modelo empírico em questão foi aplicado também à imagem Ikonos de março de 2007, somente para a região oeste da imagem, disponível para a pesquisa, a partir do aplicativo Idrisi, e é apresentada na Figura 63.

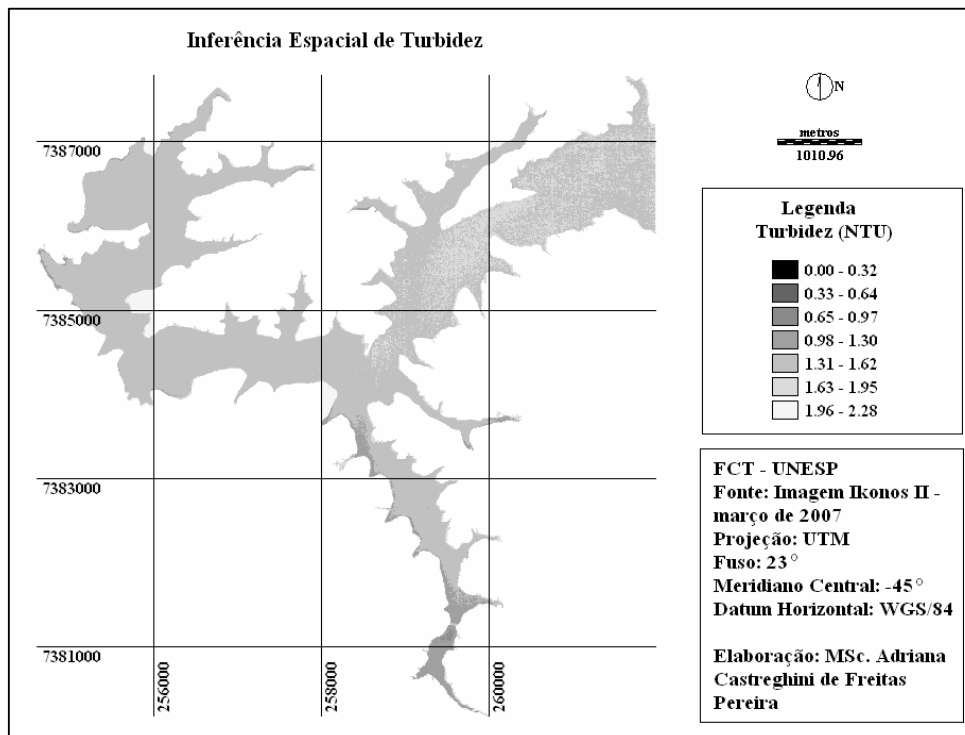


Figura 63 – Distribuição Espacial da concentração de Turbidez estimada a partir da razão de bandas B3 e B2 da imagem Ikonos de março de 2007

Observa-se na Figura 63 que ocorre uma homogeneidade na concentração de turbidez para a região analisada, com valores baixos, variando entre 0,98 e 1,86 NTU. A cobertura do solo nessa região, como pode ser verificado na Figura 9 (Capítulo 4) é prioritariamente de florestas ao norte e culturas e pastagens ao sul, apresentando áreas de florestas também no sudeste da imagem da Figura 62. Isso pode estar contribuindo favoravelmente com os baixos valores de turbidez encontrados, visto que a floresta funciona como um filtro barrando o carreamento de solo e detritos para a água do reservatório. Os maiores valores de turbidez encontram-se na área mais a nordeste do reservatório, onde há entrada de efluentes e áreas construídas (entre 1,57 e 1,68 NTU). Ao sul do reservatório verifica-se valores de turbidez mais baixos, entre 0,95 e 1,18 NTU.

Comparando-se as duas distribuições espaciais apresentadas nas Figuras 62 e 63, observa-se que os resultados são concordantes para a região possível de ser comparada,

ou seja, próximo a barragem (região oeste do reservatório), apresentando valores dentro do mesmo intervalo (entre 1,25 e 1,86 NTU), mostrando que o modelo empírico é coerente.

A Tabela 51 apresenta um resumo dos modelos empíricos gerados nesta pesquisa para inferência das variáveis limnológicas TSS, Turbidez e Condutividade Elétrica.

Tabela 51 – Resumo dos modelos empíricos de inferência gerados para cada conjunto

Conjuntos	Modelos			
	TSS	Turbidez	Condutividade Elétrica	Profundidade de Secchi
2	$\text{Log}(\text{TSS}) = 1,01 - 4,54 * \text{Log}(\text{Profundidade de Secchi})$	$\text{Log}(\text{Turbidez}) = -1,16 - 2,29 * \text{Log}(\text{Prof. Secchi}) - 1,15 * \text{Log}(571-698)$		
3			$\text{Condutividade Elétrica} = 82,9 + 2,25 * \text{Assimetria RC}$	$\text{Prof. Secchi} = 2,74 - 1,14 * (B4/B1)$
4	$\text{TSS} = 0,747 - 0,0192 * \text{Largura Contínuo}$	$\text{Turbidez} = -1,98 + 6,04 * (B3/B2)$		

Observa-se na Tabela 51 o resumo de todos os modelos empíricos gerados para inferência das variáveis limnológicas. Para o conjunto 2 foram possíveis dois modelos de inferência: inferência de TSS, a partir da Profundidade de Secchi e inferência de Turbidez, a partir da Profundidade de Secchi e os espectros medidos em campo. O conjunto 3 teve como resultado a inferência para Condutividade Elétrica em função da assimetria do contínuo removido, ou seja, a partir dos espectros medidos em campo e Profundidade de Secchi a partir da razão de bandas (B4/B1) da imagem Ikonos. Para o conjunto 4, foram gerados dois modelos: para inferência de TSS, em função da largura do contínuo removido, ou seja, utilizando os espectros de campo e para Turbidez, a partir da razão de bandas (B3/B2) da imagem Ikonos. Conclui-se, portanto, que das variáveis limnológicas analisadas, apenas Profundidade de Secchi para os elementos amostrais do conjunto 3 e Turbidez para os elementos amostrais do conjunto 4, foram significativamente inferidas pelos dados obtidos a partir da imagem multiespectral Ikonos.



## 9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da análise dos resultados obtidos na pesquisa, verifica-se que o objetivo geral proposto, ou seja, o desenvolvimento de um método para inferência de variáveis limnológicas físicas, com base em suas propriedades ópticas foi atingido, visto que as distribuições espaciais de concentração de Profundidade de Secchi e Turbidez foram geradas, a partir de modelos empíricos de inferência, usando as bandas da imagem multiespectral Ikonos de fevereiro de 2007.

Os objetivos específicos referentes a definição de um esquema de amostragem permitindo a otimização do levantamento de campo e garantindo, ao mesmo tempo, a representatividade espacial dos parâmetros coletados para a análise da qualidade da água nesses ambientes foi desenvolvido, embora não tenha sido possível a coleta de curvas espectrais em todos os pontos definidos por este esquema (72). Portanto, uma nova abordagem foi necessária, separando a amostra em quatro conjuntos de dados, relacionados às condições do tempo no momento da tomada dos pontos no reservatório. Os quatro conjuntos de dados foram: conjunto 1 (céu aberto e vento fraco), conjunto 2 (céu aberto e vento de médio a forte), conjunto 3 (céu nublado e vento fraco) e conjunto 4 (céu nublado e vento de médio a forte). Esse fato mostra que, embora seja necessário rigor no delineamento amostral, muitas vezes o mesmo não pode ser aplicado na íntegra, pois condições externas ao corpo d'água definem mudanças nas características da água, não previstas no momento de especificar a amostra.

A análise da correlação entre os dados coletados “in situ” e uma imagem multiespectral de alta resolução espacial do satélite Ikonos II, tomada quase simultaneamente ao levantamento de campo, foi também desenvolvida para os quatro conjuntos de dados e sua eficiência avaliada a partir da aplicação de métodos de regressão linear clássica às correlações encontradas. Conforme observado nos resultados apresentados, das variáveis limnológicas analisadas, a variável Profundidade de Secchi para os elementos amostrais do conjunto 3 e a variável Turbidez, para os elementos amostrais do conjunto 4, foram significativamente inferidas pelos dados obtidos a partir da imagem multiespectral Ikonos de fevereiro de 2007, gerando resultados satisfatórios e coerentes com as medidas tomadas “in situ”. Tais modelos foram aplicados também às bandas da imagem multiespectral Ikonos de março de 2007, obtendo-se resultados adequados, mesmo com a defasagem de tempo entre a aquisição desta



cena e o levantamento de campo (49 dias). Conclui-se, portanto, que a imagem multiespectral Ikonos, de resolução radiométrica de 11 bits, mesmo sem a calibração radiométrica, forneceu bons resultados na inferência das variáveis limnológicas Profundidade de Secchi e Turbidez para o corpo d'água analisado.

O método proposto utilizou técnicas de processamento de dados espectrais baseadas em espectrorradiometria para análise das curvas espectrais geradas, como remoção do contínuo e razão e diferença espectral, além daquelas tradicionalmente aplicadas às imagens multiespectrais, como as correções radiométrica e geométrica, e mostrou-se adequado ao objetivo proposto, embora diversos problemas tenham ocorrido para a aquisição quase simultânea dos dados "in situ".

A maior dificuldade encontrada na pesquisa foi adequar a aquisição da imagem Ikonos às coletas limnológicas e espectrorradiométricas em campo, que teoricamente, deveriam ocorrer no mesmo dia. Como a programação da imagem Ikonos permite que seja definido o período de aquisição, porém não o dia específico, devido a verificação automática de porcentagem de nuvens realizada pelo sensor, a aquisição da cena ocorreu com defasagem de 2 e 3 dias do trabalho de campo e a imagem obtida apresentou considerável cobertura de nuvens, inclusive sobre parte dos pontos de interesse na água do reservatório. Ainda assim foi possível a utilização das bandas dessa imagem na construção de modelos empíricos para inferência de variáveis limnológicas, com resultados satisfatórios.

Os dados espectrorradiométricos obtidos "in situ" indicaram melhores resultados de inferência para: concentrações de Turbidez no intervalo espectral entre 571 e 698 nm e a Profundidade de Secchi, para o conjunto 2; Condutividade Elétrica e a assimetria do contínuo removido, para o conjunto 3; e TSS e a largura do contínuo removido, para o conjunto 4. Esses três modelos de inferência das variáveis limnológicas a partir de dados espectrais reafirmam a importância da espectrorradiometria de campo para estudos de ambientes aquáticos, ainda que tenha havido problemas na aquisição dos dados.

Apenas um modelo empírico foi construído utilizando somente variáveis limnológicas: inferência de TSS a partir da Profundidade de Secchi, para o conjunto 2. Esse modelo é considerado muito bom, pois, além de apresentar inferência significativa nas análises, representa baixos custos de coleta em campo.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, que amostras de fitoplâncton sejam coletadas no corpo d'água, visto que, por tratar-se de uma variável opticamente ativa, pode ser



detectada através de dados e técnicas de sensoriamento remoto, obtendo resultados mais robustos.

Outra sugestão pertinente, embora onerosa, seria a tentativa de se realizar análises, a partir de imagens multiespectrais do Ikonos, em mais de um período anual no corpo d'água, o que permitiria uma melhor compreensão das características do meio aquático.

Com relação à análise estatística utilizada nas inferências, fica como sugestão a aplicação de métodos de regressão espacial em comparação aos métodos de regressão clássica aqui apresentados.



## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento Remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. São José dos Campos, 2005. 281 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos.

BRAGA, C. Z. F. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da concentração de clorofila-a, transparência e profundidade da água na Lagoa de Araruama, RJ**. 1998. 147 f. Tese (Doutorado em Geociências) Universidade Federal Fluminense - UFF, Niterói.

BRANCO, S. M.; ROCHA, A. A. **Poluição, proteção e usos múltiplos de represas**. São Paulo: Edgard Blucher, CETESB, 1977. 185p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2008.

BREUNIG, F. M. et al. (a) Aplicação da técnica de remoção do contínuo para a discriminação espectral de diferentes dosagens de Nitrogênio aplicadas ao trigo (*Triticum aestivum*, L. - IAC-370). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007a p. 91-98.

BREUNIG, F. M. et al. (b) Análise das propriedades ópticas da água do reservatório Rodolfo Costa e Silva – Itaara, RS, Brasil, usando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 2, n. 2, p. 88-102, 2007.

BRIVIO, P. A.; GIARDINO, C.; ZILIOLI, E. Validation of satellite data for quality assurance in lake monitoring applications. **The science of the environment**, v.268, p.3-18, 2001.

BUKATA, R. P. J. KOONDRATYEV, K.Y.; POZOZDNYAKOV, D.V. **Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters**. Boca Taton: CRC, 1995. 362p.

CAVENAGHI, A L. **Caracterização da qualidade de água e sedimento relacionados com a ocorrência de plantas aquáticas em cinco reservatórios da bacia do rio Tietê**. Botucatu, 2003. 67 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrônômicas) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.



CARDER, K. L.; STEWARD, R. G. A Remote-Sensing Reflectance Model of a Red-Tide Dinoflagellate Off West Florida. **Limnology and Oceanography**, Tester, v. 30, n. 2, p. 286-298, mar. 1985.

CHARNET, R.; FREIRE, C.A. De L.; CHARNET, E.M.R.; BONVINO, H. **Análise de modelos de regressão linear com aplicações**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1999.356p.

CHAVEZ, Jr., P.S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.55, p.1285-1294, 1989.

CHAVEZ, Jr., P.S. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.62, p.1025-1036, 1996.

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

CIPOLLINI, P.; CORSINI, G. The Effect of Yellow Substance on Pigment Concentration Retrieval Using ‘Blue to Green’ Ratio. **IEEE Proceedings on Oceans**. Brest, v. 1, n.94, p. 772 – 777, 1994.

CLARK, R. N. et al. Reflectance spectroscopy as rapid assessment tool for the detection of amphiboles from the Libby, Montana Region. **USGS Spectroscopy Lab**, Denver, p. 1-41, 2003.

CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **J. Geophys. Res.**, Hawaii, v. 89, p. 6329–6340, jul. 1984.

CRUSCO, N.A.; ANJOS, C.S.; FREITAS, C.C.; RENNO, C.D.; EPIPHANIO, J.C.N. Análise de regressão linear múltipla para simulação da banda do SWIR com outras bandas espectrais. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p.891-898.

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 f. Tese (PhD theses) Free University, Amsterdam.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Paulo: RIMA, 2002. 237p.

DOXORAN, D.; CHERUKURU, R.C.N.; LAVENDER, S.J. Use of reflectance band ratios to estimate suspended and dissolved matter concentrations in estuarine waters. **International Journal of Remote Sensing**. Abingdon, v. 26, n.8, p. 1763-1769, 2005.

EASTMAN, J.R. **Idrisi for windows – User's guide**. Word center, Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, Clark University. v. 2, 1998.

ENNES, R. **Potencial das imagens hiperespectrais orbitais na detecção de componentes opticamente ativos no reservatório de Itupararanga**. 2008. 127f. (Mestrado em Ciências Cartográficas) Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT – Unesp, Presidente Prudente, SP.

ENVI, ENVI User's Guide. Research System, Inc, 2007. p.1142.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência/Finep. 2.ed. 575p. 1998.

EKERCIN, S. Water quality retrievals from high resolution Ikonos multispectral imagery: a case study in Istanbul, Turkey. **Water air soil pollut**, v.183, p.239-251, 2007.

ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES, INC. **FieldSpec UV/VNIR – HandHeld Spectroradiometer**. User's Guide. USA, 2002.

GALO, M.L.B.T.; VELINI, E.D.; TRINDADE, M.L.B.; SANTOS, S.C. Uso do sensoriamento remoto orbital no monitoramento de dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v.20, p.7-20, 2002. Edição Especial.

GALO, M.L.B.T.; VELINI, E.D.; TRINDADE, M.L.B.; LIMA, D.L. Uma aplicação de sensoriamento remoto orbital no monitoramento de áreas infestadas por plantas aquáticas. **I SIMGEO – I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, 1-3 setembro, 2004. Recife: DECart, PPGCGTG/UFPE, Anais CD-ROM, 2004.



GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.94, n.4, p.523-34, 2005.

GEOEYE (Space Imaging). **Ikonos Multispectral Images**. Disponível em: <<http://www.geoeye.com>> Acesso em: 2007 e 2008.

GIARDINO, C.; PEPE, M.; BRIVIO, P. A.; GHEZZI, P.; ZILIOLI, E. Detecting chlorophyll, secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. **The Science of the total environment**, v.268, p.19-29, 2001.

GITELSON, A et al. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 7, p.1269-1295, 1993.

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

GITELSON, A. A.; KONDRATYEV, K. Y. Optical models of mesotrophic and eutrophic water bodies. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 3, p. 373–385, 1991.

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

GOWARD, S.N.; DAVIS, P.E.; FLEMING, D.; MILLER, L.; TOWNSHEND, J.R. Empirical comparison of Landsat 7 and Ikonos multispectral measurements for selected Earth observation System (EOS) validation sites. 2003. **Remote Sensing of Environment**, v.88, pp.80-99.

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

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



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

JENSEN, R.J. **Remote Sensing of Environment: an Earth Resource Perspective**. Upper Saddle River:Prentice Hall, 2000. 544p.

KAMBEL, M.; NOVO, E. M. L. M. O Sensoriamento Remoto da cor da água. In: SOUZA, R. B. **Oceanografia por satélites**. São Paulo: Oficina de textos, 2005. p. 179-196.

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

KOKALY, R. F.; CLARK, R. N. (1999). Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, v. 67, p. 267– 287, 1999.

KRUSE, F. A. et al. Expert system-based mineral mapping in northern death valley, California/Nevada, using the Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, St. Paul, v.44, n. 2-3, p. 309 – 336, 1993.

LAMPARELLI, R. A.; ROCHA, J.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, UNICAMP, 2001. 118p.

LATORRE, M. L. **Utilização de um método de correção atmosférica para o processamento de dados hiperespectrais do sensor AVIRIS em regiões tropicais**. 1998. 106 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

LIBOS, M.I.P.C. **Modelagem da poluição não pontual na bacia do Rio Cuiabá baseada em geoprocessamento**. Rio de Janeiro, 2002. 269 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - UFRJ, Rio de Janeiro.

LONDE, L.R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 223 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos. no prelo.



LOUCHARD, E. M. et al. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments. **Optical express**. v. 10, n. 26, p.1573, 2002.

LUGNANI, J.S. **Introdução à fotogrametria**. Curitiba, 1987. 134p.

MAGALHÃES, M.M.; LIMA, A.C.P. **Noções de Probabilidade e Estatística**. São Paulo: EDUSP, 2005. 392p.

MALTHUS T. J.; DEKKER A. G. First derivative indices for the remote sensing of inland water quality using high spectral resolution reflectance. **Environment International**. v. 21, n. 2, p. 221-232, 1994.

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

MITTENZWEY, K. -H.; GITELSON A. A.; KONDRATYEV, K.Y. Determination of Chlorophyll *a* of Inland Waters on the Basis of Spectral Reflectance. **Limnology and Oceanography**, v. 37 p. 147-149, 1992.

MÔNICO, J.F.G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2000.

MUSTARD, J. F.; SUNSHINE, J. M. Spectral Analysis for Earth science: Investigations Using Remote Sensing Data. In: RENCZ A. N. **Remote Sensing for the Earth sciences**. New York: John Wiley & Sons, Inc.1999.v. 3, c. 5, p. 251-374.

MUTANGA, O.; SKIDMORE A. D. Integrating imaging spectroscopy and neural networks to map grass quality in the Kruger National Park, South Africa. **Remote Sensing of Environment**. v.90, p. 104-115, 2003.

MOBLEY, C.D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. 1999. **Applied Optics**, v.38, n.36, pp.7442-7455.

NEOPHYTOU, E.; CHARITOU, A.; CHARALAMBOUS, C. **Predicting corporate failure: empirical evidence for the UK**. University of Southampton, Sep. 2000, Working Paper.



NOBREGA, I. W. **Análise espectral de sistemas aquáticos da amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos**. 2002. 87 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

NOVO, E.M.L.M.; HANSOM, J.D.; CURRAN, P.J. **The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration**. *International Journal of Remote Sensing*, v.10, n.7, p.1283-1289, 1989.

NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.C.F.; FREITAS, R.M.; SHIMABUKURO, Y.E.; MELACK, J.M.; PEREIRA FILHO, W. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. *Limnology*, 2006.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Tradução de Christopher J. Tribe. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

PAGIORO, T. A. **Variações espaço-temporais das características físicas e químicas da água, material em sedimentação e produtividade primária fitoplanctônica no reservatório de Itaipu – PR – Brasil**. Maringá, 1999. 59 f. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais – Ciências Ambientais) – UEM, Maringá, PR.

PEREIRA FILHO, W.; BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M. 2005. Influência das condições do tempo em espectros de reflectância da água. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia-GO, pp.415-422.

PU, R. et al. Spectral absorption features as indicators of waters status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n.9, p. 1799 – 1810. 2003.

QUEIROZ, R. P.; IMAI, N.N.; GALO, M.L.B.T. **Mapeamento das atividades antrópicas na área de entorno do reservatório de Itapararanga-SP**. Relatório PIBIC 2005/2006, FCT Unesp, Presidente Prudente.

QUIBELL, G. The effect of Suspended Sediment on Reflectance from Freshwater Algae. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n.1, p. 177 – 182, jan.1991.

REIS, R.S.; NOVO, E.M.L.M.; ESPÍNDOLA, E.L.G.; SEVERI, W. Uso de imagens Landsat e dados de campo para avaliar a distribuição espacial de material em suspensão em reservatórios do semi-árido brasileiro. **Anais XI SBSR**, Belo Horizonte, INPE, p.2569-2577, 2003.



RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote Sensing digital image analysis: An Introduction**. 4. ed. Australia: Springer, 2006.

RITCHIE, J.C.; COOPER, C.M. Comparison of measured suspended sediment concentration with suspended sediment concentrations estimated from Landsat MSS data. **International Journal for Remote Sensing**, v. 9, n.3, p.379-387, 1998.

ROBIN M. **La Télédétection**. Coll. FAC Géographie. Paris: Nathan, 1995.

ROCHA, R.R.A. **Limnologia comparativa e preditiva de rios e lagoas da planície de inundação do alto rio Paraná (PR/MS-Brasil)**. Maringá, 2003. 69 f. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) – Universidade Estadual de Maringá-PR.

RUDDICK, K. G. et al. Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two band algorithm with optimal error properties. **Applied Optics**, v. 40, p. 3575–3585, 2001.

RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/eo-1 e de espectrorradiômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

RUNDQUIST, D. C.; LUOHENG, H.; SCHALLES, J. F.; PEAKE, J. S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 2, p. 195-200, 1996.

SÃO PAULO. **Caracterização geral da UGRH 10**, 1998. Disponível em: <<http://www.rededasaguas.org.br/comite/relsmstseg.pdf>>. Acesso em: 2007 e 2008.

SCARPACE, F.L.; HOLMQUST, K.W.; FISHER, L.T. Landsat analysis of lake quality. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.45, n.5, p.623-633, 1979.

SCHOWENGERDT, R.A. **Remote Sensing Models and methods for Image Processing**. London: Academic Press, third edition, 515p. 2006.



SOUDANI, K.; FRANÇOIS, C.; Le MAIRE, G.; Le DANTEC, V.; DUFRÊNE, E. Comparative analysis of Ikonos, Spot, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. 2006. **Remote Sensing of Environment**, v. 102, pp.161-175.

TACHIBANA, V.M.; IMAI, N.N.; ENNES, R.; VICENTIN, D.M. Aplicação de técnicas utilizando regressão clássica e espacial na cidade de Presidente Prudente-SP. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, Presidente Prudente-SP, pp.719-725.

THOMPSON, S.K. **Sampling**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2<sup>nd</sup> edition, 2002. 367p.

TAI F., PHILPOT W. Derivative Analyses of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**. v. 66, p. 41–51, 1998.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RIMA, Ite, 2003. 247p.

VAN NIEUWENHUYSE, E.E.; JONES, J.R. Phosphorus-chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area. **Canadian Journal of Fish Aquatic Science**, Canadá, v.53, p.99-105, 1996.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de engenharia sanitária e ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243p.

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

YACOBI, Y. Z., GITELSON, A., & MAYO, M. (1995). Remote sensing of chlorophyll in Lake Kinneret using high spectral resolution radiometer and Landsat TM: Spectral features of reflectance and algorithm development. **Journal of Plankton Research**, Tiberias, n. 17, p. 2155–2173, 1995.

ZULLO JR., J. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 1994. 194p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.



### **Bibliografia Consultada**

BAILEY, T.C. & GATRELL, A.C. **Interactive Spatial Data Analysis**. Longman Scientific & Technical, England, 1995.

BRITES, R.; SOARES, V. RIBEIRO, C. A. Efeitos de estratégia de amostragem na exatidão reportada pelo índice Kappa na classificação de imagens orbitais. In: **Simpósio Brasileiro de sensoriamento remoto**, VIII, 1996, Salvador. Anais. São José dos Campos: INPE, V.1. p.1-7, 1996.

BURROUGH, P. A.. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford, Clarendon Press, 1987. 193p.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. São Paulo: Atual, 1987. 321p.  
CÂMARA,G. MONTEIRO, A.M.; FUCKS, S.D.; CARVALHO, M.S. **Análise espacial e Geoprocessamento**. Livro on-line, 1998.

CAMARGO, E. C. G.. **Apostila do curso – Geoprocessamento para Projeto Ambientais**. Cap.12. São José dos Campos, 1998. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

CAMARGO, E.C.G; FUCKS,S.D.;CÂMARA,G. **Análise Espacial de Superfícies**. Cap.3 livro on-line, 2002.

CERQUEIRA, E.O.; POPPI, R.J.; KUBOTA, L.T. Utilização de filtro de transformada de Fourier para a minimização de ruídos em sinais analíticos. **Química Nova**, São Paulo, v.23, n.5.

CONDINI, P.; SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE (SMA). **A Qualidade das Águas**. São Paulo, 2001, 31p.

DEKKER, A.G.; MALTHUS, T. J.; SEYHAN, E. Quantitative modelling of inland water quality for high resolution MSS systems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n.1, Jan. 1991.

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



JARDIM-LIMA, D.; ALCÂNTARA, E.; SOPPA, M.; CLARO, M. Análise quantitativa do comportamento espectral da clorofila “a” do Reservatório de Salto Grande (SP). **INPE - Comunicação Interna**. São José dos Campos, 2005.

LIBOS, M.I.P.C.; FILHO, O.C.R.; ZEILHOFER, P. Sensoriamento Remoto (SR) e sistema de informações geográficas (SIG) para modelagem de qualidade da água. Estudo de caso: Bacia do Rio Cuiabá. **Anais XII SBSR**, Goiânia, INPE, p.2219-2227, 2005

LUIZ, A.J.B.; GURTLER, S.; GLERIANI, J.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; CAMPOS, R.C. Reflectância a partir do número digital de imagens ETM+. 2003. **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte – MG, pp.2071-2078.

McBRATNEY, A.B.; WHELAN, B.M.; WAVOORT, D.J.J.; MINASNY, B. **A purposive sampling scheme for precision agriculture**.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001, 250p.

MONTGOMERY, D. C., PECK, E. A., VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. New York : John Wiley & Sons, 2001, 3<sup>rd</sup>. ed.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 308p.

NOVO, E.M.L.M.; BRAGA, C.Z.F.; TUNDISI, J.G. Use of TM/Landsat data to retrieve the optically active water constituents from a eutrophic tropical reservoir. **Proceedings of ISPRS Commission VII Symposium: Resource and Environmental Monitoring**, Rio de Janeiro, sept. 20-30, 1994, INPE, Vol.30, Part76, 1994, p.258-262.

PEREIRA, A.C.F.; GALO, M.L.B.T.; VELINI, E.; NOVO, E.M.L.M. PEREIRA, A. C. F.; GALO, M. L. B. T.; VELINI, E. D.; NOVO, E. M. L. M. 2007. Amostragem em corpos d’água: Definição de elementos amostrais, posicionamento e coleta de dados “in situ”. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, Presidente Prudente-SP, pp.866-874.

PEREIRA FILHO, W. Relações entre macrófitas aquáticas flutuantes e uso da terra, o caso do reservatório da UHE-Tucuruí. **Anais IX SBSR**, Santos, INPE, p.1-7, 1998.



PONZONI, F.J.; JÚNIOR, J.Z.; LAMPARELLI, R.A.C. **Calibração absoluta de sensores orbitais: conceituação, principais procedimentos e aplicação.** São José dos Campos, SP: A.Silva Vieira Ed., 2007. 65p.

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.** São Paulo, 2000. 130 f. Tese (Doutorado em Geografia) - USP, São Paulo.  
REBOUÇAS, A. **Uso inteligente da água.** São Paulo: Escrituras Editora, 2004. 207 p.

RUDORFF, C.M.; NOVO, E.M.L.M.; GALVÃO, L.S.; PEREIRA FILHO, W. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazônica**, v.37(2), p.269-280, 2007.

SCHIEBE, F. R.; HARRINGTON, JR. J. A.; RITCHIE, J. C. Remote sensing of suspended sediments: the Lake Chicot, Arkansas project. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 8, p. 1487-1509, 1992.

RITCHIE, J.C.; SCHIEBE, F.R.; MCHENRY, J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.42, p.1540-1545, 1976.

RITCHIE, J.C.; ZIMBA, P.V.; EVERITT, J.H. Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.69, n.6, p. 695-704, 2003.

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento.** Tradução: Alfredo Alves de Farias. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 350p.

SILVA, B.S.G.; VALERIANO, D.M. Correção atmosférica e topográfica de imagens de satélite em terrenos montanhosos. 2005. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia – GO, pp.3587-3594.

SOUZA, A. D. G.; TUNDISI, J. G. Water quality in watershed of the Jaboatão river (Pernambuco, Brazil): a case study. **Brazilian archives of biology and technology, an international journal**, v. 46, n. 4, p.711-721, 2003.

STEFFEN, C. A. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. , 1996, Salvador, **Anais...**, INPE. v. 8, p. 969-975, 1996.



TUNDISI et al. **Ecosistema de águas interiores**. In: REBOUÇAS et al. Águas doces no Brasil: Capital ecologia, uso e conservação São Paulo: Escrituras Editora, p. 153-192, 2002.

UNEP-IETC/ILEC. **Lagos e reservatórios**. Qualidade da água: o impacto da eutrofização, v.3, 2001.

VAN DER MEER, F.; SCHIMIDT, K.S.; BAKKER, W.; BIJKER, W. New environmental remote sensing systems. **In: Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing**. Skidmore, A., Editor-in-Chief. London: Taylor & Francis, 2002, p.26-51.

VELINI, E. D.; CAVENAGHI, A.L.; NEGRISOLI, E.; MARTINS, D.; ARRUDA, D. P.; TRINDADE, M. L. B.; SANTOS, S. C.; SEMIONATO, J. L. <sup>a</sup> Avaliação da qualidade de água e sedimento em dez reservatórios dos rios Tietê, Grande, Pardo e Mogi-Guaçu. **In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, I CITENEL**, 2001, Brasília. Anais em CD-ROM, Brasília: ANNEL, 6 e 7 de novembro de 2001, 3p.



## **APÊNDICE A – VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS COLETADAS “IN SITU”**



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

Pontos	Cond. Elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Turbidez (NTU)	Prof. Secchi (m)	Sólidos Suspensão (mg/L)
1	85,00	0,86	3,00	0,160
2	84,80	0,36	2,60	0,105
3	84,90	0,77	2,70	0,235
4	85,10	0,86	2,30	0,195
5	84,60	0,39	2,60	1,725
6	84,10	1,06	2,60	0,195
7	85,10	0,30	2,80	0,155
8	84,20	0,21	2,70	0,130
9	84,40	0,95	2,40	0,185
10	84,40	3,54	2,50	0,210
11	83,30	0,41	2,00	0,230
12	84,80	0,43	2,40	0,065
14	84,30	1,04	2,50	0,295
15	84,60	0,29	2,40	0,170
16	85,00	0,98	2,20	0,210
17	85,20	1,22	2,50	0,035
18	84,40	0,39	2,90	0,075
19	84,10	0,55	2,20	0,170
21	84,20	1,26	2,40	0,160
22	84,50	0,57	2,20	0,170
23	84,40	1,02	2,30	0,275
25	83,80	0,43	2,60	0,165
26	84,10	0,31	2,80	0,230
27	84,20	0,57	2,60	0,090
28	83,30	0,97	2,20	0,385
29	81,00	0,90	1,90	0,680
30	82,50	1,31	2,50	0,240
31	82,30	1,03	2,00	0,045
32	82,40	1,97	2,00	0,135
33	82,10	1,31	2,60	0,070
34	83,40	0,46	2,10	0,460
35	83,90	1,07	2,40	0,135
36	84,90	0,32	2,10	0,130
38	84,60	1,33	2,20	0,020
43	80,50	0,74	2,20	0,075
46	79,00	0,43	2,00	0,040
48	77,10	1,60	2,00	0,055
53	78,30	1,53	2,00	0,180
58	79,40	0,85	2,20	0,160
59	79,80	1,30	2,20	0,145
63	78,80	1,05	2,00	0,105
65	76,80	1,84	1,80	0,135
69	77,60	1,39	1,80	0,090
70	74,40	1,83	1,60	0,115
78	79,70	4,55	1,70	0,195
83	76,40	1,78	1,90	0,170
92	73,20	3,80	1,90	0,095
95	75,40	2,34	1,90	0,075
101	72,30	2,34	1,00	0,240



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP.

---

103	75,60	1,91	1,60	0,070
104	75,80	1,94	1,70	0,200
108	72,80	2,90	1,20	0,110
109	74,00	2,79	1,30	0,080
111	75,50	3,81	1,40	0,220
114	72,50	3,33	1,20	0,090
117	67,70	2,43	1,00	0,260
122	63,30	2,55	1,00	0,040
124	75,60	4,80	1,10	0,230
126	76,70	4,11	1,10	0,315
127	76,10	3,55	1,10	0,270
128	74,70	3,47	1,20	0,105
129	76,10	3,55	1,20	0,125
130	77,00	4,11	1,30	0,110
134	76,40	5,81	1,20	0,230
135	78,30	4,20	1,20	0,150
138	79,50	4,64	1,00	0,220
141	80,90	3,50	1,10	0,150
145	82,50	2,94	0,90	0,085
148	81,10	3,43	0,90	0,060
149	79,50	4,89	1,10	0,175
151	77,50	4,08	0,90	0,190



**APÊNDICE B: SUAUIZAÇÃO DAS CURVAS DE FATOR DE REFLECTÂNCIA (FR)  
APLICANDO FILTROS LINEARES DE MÉDIA MÓVEL E TRANSFORMADA DE  
FOURIER**



As curvas de Fator de Reflectância Bidirecional da água (FRB) das estações amostrais localizadas no Reservatório de Ituparanga/SP foram obtidas com o espectrorradiômetro FieldSpec UV/VNIR, que mede a radiância com uma resolução espectral de 1 nm ao longo da faixa de 400 - 1000 nm. O FRB da água foi calculado usando a seguinte equação:

$$R_{\text{água}}(\lambda) = \frac{ND_{\text{água}}(\lambda)}{ND_{\text{placa}}(\lambda)} \times R_{\text{placa}}(\lambda) \quad (1)$$

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

O FRB medido apresentou baixos valores de reflectância da água (entre 0 e 0,12), o que resultou grande intensidade de ruídos nas curvas, como pode ser observado na Figura 1, que mostra as curvas espectrais coletadas com o espectrorradiômetro em 35 pontos amostrais. Observa-se ainda na figura 1 um pico suave de reflectância entre os comprimentos de onda de 550 nm a 600 nm e um pico de absorção entre 600 nm e 650 nm.

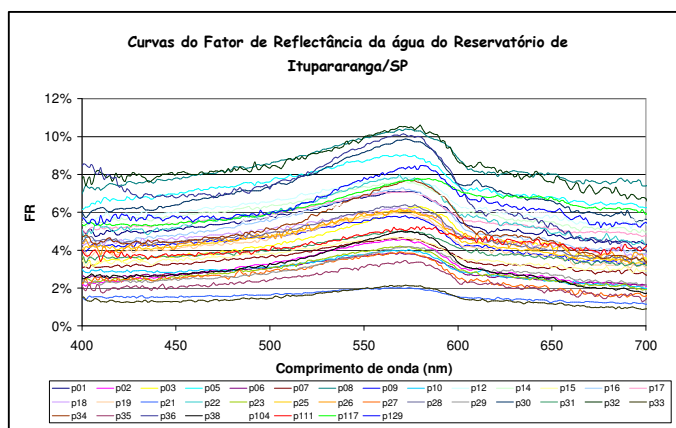


Figura 1 – Curvas do Fator de Reflectância da água do Reservatório de Ituparanga/SP

De modo a remover o ruído dos espectros, foram testados filtros de suavização lineares de média móvel de três, quatro, cinco, sete e nove pontos (Tsai e Philpot, 1998; Rudorff, 2005), além da suavização por transformada de Fourier nos espectros de 400 nm a 700 nm. Os dados a partir de 700 nm não foram considerados nas análises por apresentarem alta absorção por ruídos.

A fim de analisar o impacto de cada filtro de suavização sobre as feições de absorção e reflectância, foram geradas tabelas comparativas para os conjuntos de curvas, como pode ser observado nas Tabelas de 1 a 35. Nessas tabelas os picos e vales foram determinados aplicando-se a primeira derivada em todos os espectros. Além disso, fez-se necessário analisar as curvas espectrais a partir da observação dos comprimentos de onda diagnósticos de absorção de pigmentos, uma vez que estes demonstrarão a presença ou não de componentes opticamente ativos no corpo d'água, neste caso o fitoplâncton. Para tanto, baseou-se nos estudos de Kirk (1994), Rundquist et al. (1996) e Barbosa (2005) sobre o comportamento do fitoplâncton nas curvas de reflectância espectral.

Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

O filtro de suavização escolhido para cada curva foi aquele que reduziu o ruído aleatório sem alterar significativamente a posição das feições ( $\lambda_{\max}$  e  $\lambda_{\min}$ ) e o módulo da derivada (Valor máximo e valor mínimo).

Tabela 1 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 01**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máximo (nm)	$\lambda$ mínimo (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	566	700	-0,016	-0,016
Filtro média 3	565	700	-0,004953	-0,036556
Filtro média 4	571	700	-8,798 E-05	-0,025861
Filtro média 5	570	700	-0,000515	-0,023054
Filtro média 7	569	700	-0,000766	-0,024245
<b>Filtro média 9</b>	<b>566</b>	<b>700</b>	<b>-0,000756</b>	<b>-0,020895</b>
Suavização por Transf. Fourier	573	700	0	-0,035

Na tabela 1 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 566 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Esses picos são característicos de presença de clorofila, segundo Barbosa (2005) e Kirk (1994). O filtro de suavização que manteve a posição da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média com janela 9x9 (Figura 2). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que não houve modificação no valor mínimo, ocorrendo uma diminuição na posição do máximo. Os outros filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente a suavização por Transformada de Fourier, porém não preservaram a posição dos comprimentos de onda e alteraram os valores máximo e mínimo.

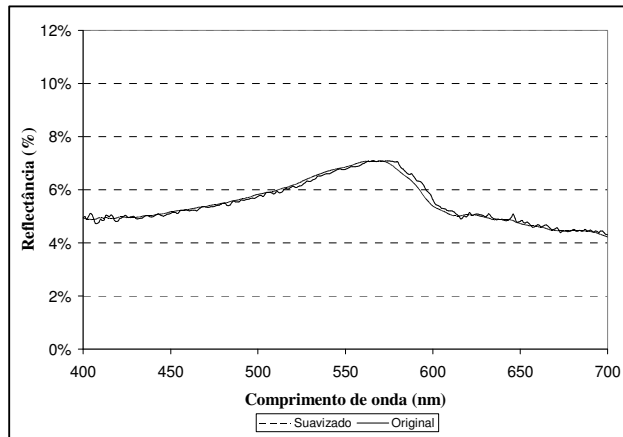


Figura 2 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 01

Tabela 2 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 02**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	566	700	-0,0271	-0,02551
Filtro média 3	570	700	-0,01208	-0,00904
Filtro média 4	570	700	-0,01779	-0,01238
Filtro média 5	569	700	-0,01235	-0,01136
Filtro média 7	565	700	-0,00281	0,005697
Filtro média 9	564	700	-0,002513	0,00316664
<b>Suavização por Transf. Fourier</b>	<b>568</b>	<b>700</b>	<b>-0,005</b>	<b>-0,015</b>



## Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP.

A curva espectral original do ponto 02 apresentada na tabela 2 mostra um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 566 nm e um pico de absorção em 700 nm. Esses picos são característicos de presença de clorofila, segundo Barbosa (2005) e Kirk (1994). Embora o filtro de suavização que manteve a posição da feição seja o de média com janela 7x7, aquele que alterou pouco a posição em  $\lambda$  máximo mas foi mais eficiente na redução do ruído foi a suavização por transformada de Fourier (Figura 3). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve modificação nos valores mínimo e máximo, ocorrendo uma diminuição na posição dos mesmos.

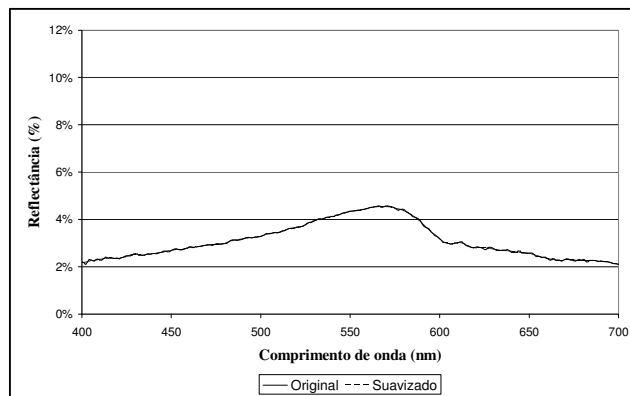


Figura 3 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 02

Tabela 3 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 03**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	580	406	-0,043390	0,047741
Filtro média 3	579	405	-0,02156	0,040696
Filtro média 4	577	405	-0,00446	0,055424
Filtro média 5	577	405	-0,00741	0,06399
Filtro média 7	576	403	-0,007	0,007873
Filtro média 9	574	700	-0,00226	-0,02469
<b>Suavização por Transf. Fourier</b>	<b>580</b>	<b>406</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,045</b>

Na tabela 3 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 580 nm e um pico de absorção em 406 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 580 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994); já o pico de absorção em 406 nm encontra-se aquém do previsível para esse pigmento, onde a absorção deveria apresentar um mínimo em 438 nm, de acordo com Barbosa (2005); embora seja reconhecido como havendo a presença do fitoplâncton por Kirk (1994), que apresenta o intervalo de absorção entre 400 e 515 nm. O filtro de suavização que manteve a posição da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi a suavização por transformada de Fourier (Figura 4). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que não houve modificação no valor máximo, ocorrendo uma diminuição na posição do mínimo. Os outros filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram a posição dos comprimentos de onda e alteraram os valores máximo e mínimo.



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

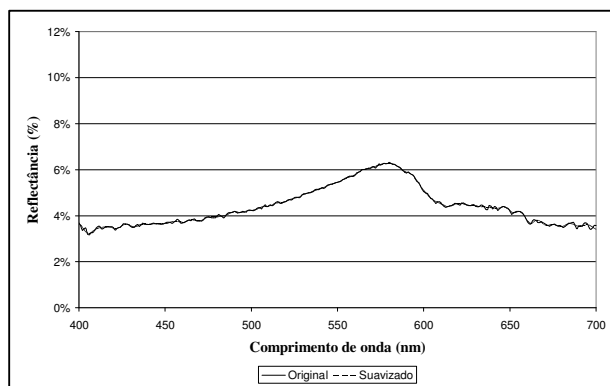


Figura 4 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 03

Tabela 4 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 05**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máximo (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	572	400	-0,04296	0,065636
Filtro média 3	570	400	-0,01345	0,048017
Filtro média 4	570	400	-0,01579	0,057067
Filtro média 5	568	400	-0,00292	0,061157
Filtro média 7	567	696	-0,00953	0,014364
Filtro média 9	565	700	-0,00235	-0,00833
<b>Suavização por Transf. Fourier</b>	<b>572</b>	<b>400</b>	<b>-0,005</b>	<b>0,02</b>

Na tabela 4 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 572 nm e um pico de absorção em 400 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 572 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994); já o pico de absorção em 400 nm encontra-se aquém do previsível para esse pigmento, onde a absorção deveria apresentar um mínimo em 438 nm, de acordo com Barbosa (2005); embora seja reconhecido como havendo a presença do fitoplâncton por Kirk (1994), que apresenta o intervalo de absorção entre 400 e 515 nm. O filtro de suavização que manteve a posição da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi a suavização por transformada de Fourier (Figura 5). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve modificação para menor tanto no valor máximo quanto no valor mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram a posição dos comprimentos de onda e alteraram os valores máximo e mínimo. Cabe ressaltar aqui o fato de que os filtros de média 7 e 9 apresentarem valores de comprimento de onda mínimo em 696 e 700 nm, respectivamente, ou seja, alterando completamente a posição de mínimo da curva original, não podendo ser escolhidos para reduzir o ruído de tal curva.



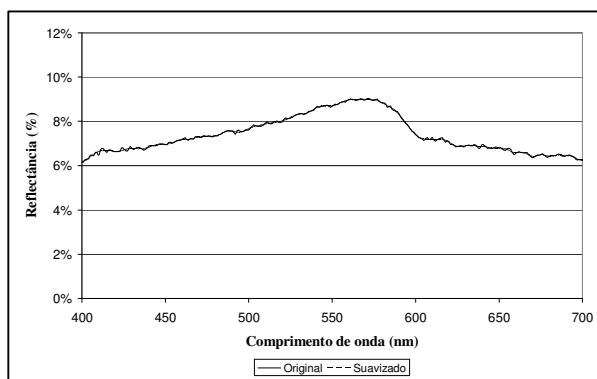


Figura 5 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 05

Tabela 5 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 06

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	569	692	-0,024982	0,033408
Filtro média 3	563	700	-0,00708	-0,02551
Filtro média 4	563	700	-0,00974	-0,00728
Filtro média 5	562	700	-0,00657	-0,00957
Filtro média 7	563	700	-0,00209	-0,01315
Filtro média 9	562	700	-0,00315	-0,01275
<b>Suavização por Transf. Fourier</b>	<b>566</b>	<b>700</b>	<b>-0,005</b>	<b>-0,015</b>

Na tabela 5 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 692 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 569 nm é bastante característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 692 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição em  $\lambda$  máximo da feição reduzindo o ruído aleatório foi a suavização por transformada de Fourier (Figura 6), embora não tenha mantido a posição do  $\lambda$  mínimo (nenhum filtro manteve tal posição). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que não houve modificação nos valores de máximo e mínimo, ocorrendo uma diminuição em suas posições. Os outros filtros também reduziram o ruído aleatório, porém ficaram distantes da posição do comprimento de onda máximo e mínimo originais, além de alterarem os valores máximo e mínimo da derivada.

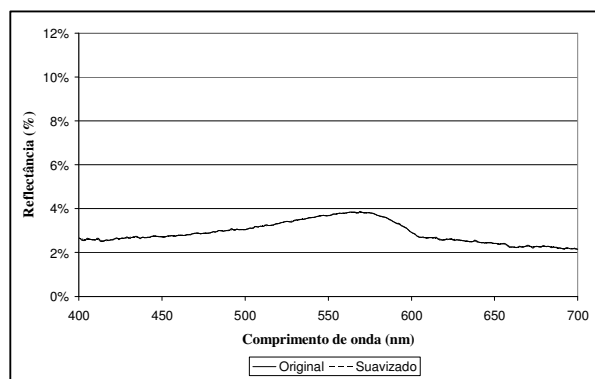


Figura 6 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 06

Tabela 6 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 07

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	569	700	-0,00710991	0,00590304
Filtro média 3	569	700	-0,019259636	0,009039159
Filtro média 4	569	700	-0,02157	0,009118
Filtro média 5	568	700	-0,01299	-0,00418
Filtro média 7	566	700	-0,003	-0,01171
Filtro média 9	564	700	-0,00477	-0,01019
<b>Suavização por Transf. Fourier</b>	<b>569</b>	<b>700</b>	<b>-0,005</b>	<b>-0,01</b>

Na tabela 6 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Tais picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 7). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve pouca alteração (para menos) no valor máximo, ocorrendo uma diminuição na posição do mínimo. Os demais filtros de suavização também reduziram o ruído aleatório, os filtros de média 3 e 4 preservaram a posição dos comprimentos de onda, porém alteraram os valores máximo e mínimo e não reduziram o ruído tão eficientemente quanto o filtro de Fourier.

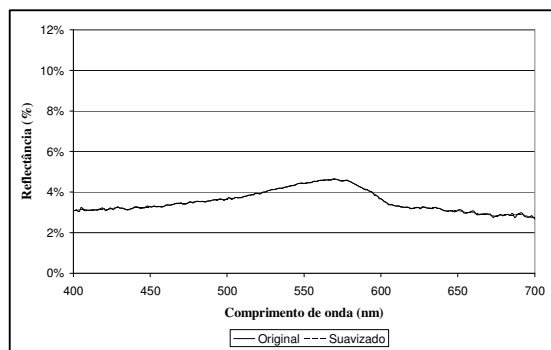


Figura 7 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 07

Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

Tabela 7 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 08**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	572	400	-0,0202599	0,22944537
Filtro média 3	572	400	-0,01269	0,079649
Filtro média 4	572	400	-0,01988	0,056373
Filtro média 5	572	407	-0,01967	0,024253
Filtro média 7	569	406	-0,0052	0,031102
Filtro média 9	568	400	-0,0071	0,017708
<b>Suavização por T. Fourier</b>	<b>572</b>	<b>400</b>	<b>0</b>	<b>0,03</b>

Na tabela 7 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 572 nm e um pico de absorção em 400 nm (para a curva original). Assim como ocorreu na curva espectral do ponto 04, o pico de reflectância em 572 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994); já o pico de absorção em 400 nm encontra-se aquém do previsível para esse pigmento, onde a absorção deveria apresentar um mínimo em 438 nm, de acordo com Barbosa (2005); embora seja reconhecido como havendo a presença do fitoplâncton por Kirk (1994), que apresenta o intervalo de absorção entre 400 e 515 nm. O filtro de suavização que manteve a posição da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 8). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve modificação para menor tanto no valor máximo quanto no valor mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, a maioria deles preservou a posição dos comprimentos de onda e alguns valores de máximo apresentaram-se bem próximos do valor da curva original, porém o filtro de transformada de Fourier foi mais eficiente na remoção do ruído aleatório.

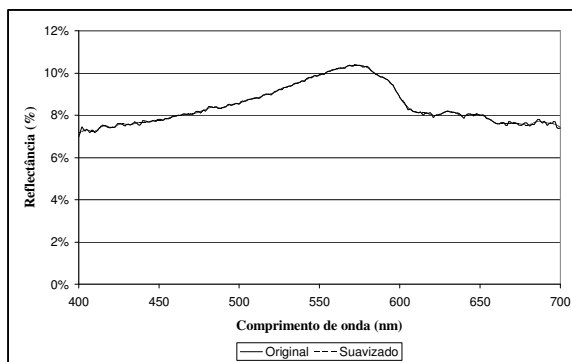


Figura 8 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 08

Tabela 8 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 09**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	572	696	-0,05134602	0,029515802
Filtro média 3	565	695	-0,01122	0,024541
Filtro média 4	563	694	-0,00118	0,011208
Filtro média 5	563	700	-0,00654	-0,03343
Filtro média 7	562	700	-0,004	-0,02365
Filtro média 9	564	700	-0,00554	-0,02974
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>566</b>	<b>697</b>	<b>-0,005</b>	<b>0,01</b>



## Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

Observando-se a tabela 8 verifica-se que o pico de reflectância em 572 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994); já o pico de absorção em 696 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada tanto em  $\lambda$  máximo quanto em  $\lambda$  mínimo, e reduzindo o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 9). Nenhum filtro testado manteve as posições originais. Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve diminuição nos valores de máximo e mínimo.

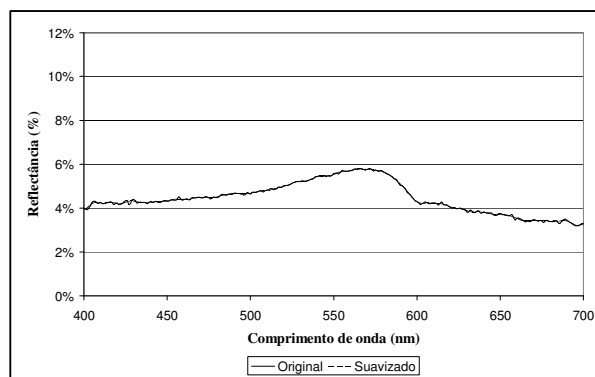


Figura 9 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 09

Tabela 9 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 10**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	574	700	-0,039	-0,00095
<b>Filtro média 3</b>	<b>573</b>	<b>700</b>	<b>-0,02325</b>	<b>-0,01706</b>
Filtro média 4	571	700	-0,00044	-0,01778
Filtro média 5	570	700	-0,00533	-0,01724
Filtro média 7	569	700	-0,00507	-0,01125
Filtro média 9	566	700	-0,00024	-0,00698
Suavização T. Fourier	571	700	-0,005	-0,01

Na tabela 9 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 574 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Esses picos são característicos de presença de clorofila, segundo Barbosa (2005) e Kirk (1994). O filtro de suavização que manteve a posição da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média com janela 3x3 (Figura 10). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve um aumento no valor mínimo, ocorrendo uma diminuição na posição do máximo. Os outros filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente a Transformada de Fourier, porém não preservaram a posição do comprimento de onda máximo tão bem quanto o filtro de media 3 e alteraram os valores máximo e mínimo.



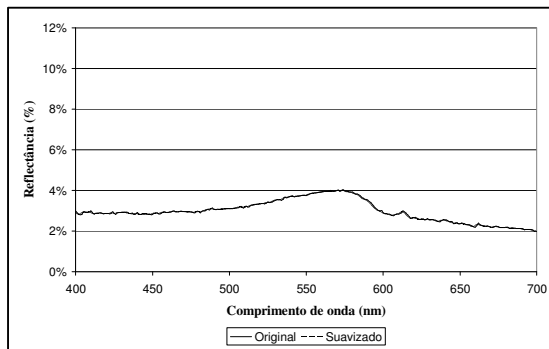


Figura 10 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 10

Tabela 10 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 12

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	571	692	-0,00156825	0,12193059
<b>Filtro média 3</b>	<b>571</b>	<b>691</b>	<b>-0,00882</b>	<b>0,063244</b>
Filtro média 4	571	700	-0,02255	-0,01044
Filtro média 5	570	700	-0,01929	-0,0382
Filtro média 7	568	700	-0,01072	-0,02773
Filtro média 9	567	700	-0,01315	-0,03621
Suavização T. Fourier	571	694	-0,01	0,015

Na tabela 10 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 571 nm e um pico de absorção em 692 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 571 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 692 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média com janela 3x3 (Figura 11). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve um aumento no valor máximo, ocorrendo uma diminuição na posição do mínimo. Os outros filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente a Transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.

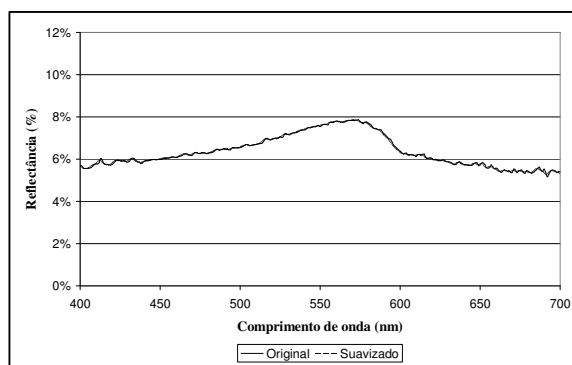


Figura 11 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 12

Tabela 11 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 14

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	569	700	-0,01484	-0,01341
Filtro média 3	568	700	-0,00686	-0,05067
Filtro média 4	568	700	-0,00979	-0,03329
Filtro média 5	568	700	-0,01631	-0,03251
Filtro média 7	567	700	-0,01082	-0,01809
Filtro média 9	565	700	-0,00054	-0,01237
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>569</b>	<b>700</b>	<b>0</b>	<b>-0,035</b>

Observa-se na tabela 11 um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Tais picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 12). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve pouca alteração (para mais) no valor máximo, ocorrendo uma diminuição na posição do mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém modificaram as demais características.

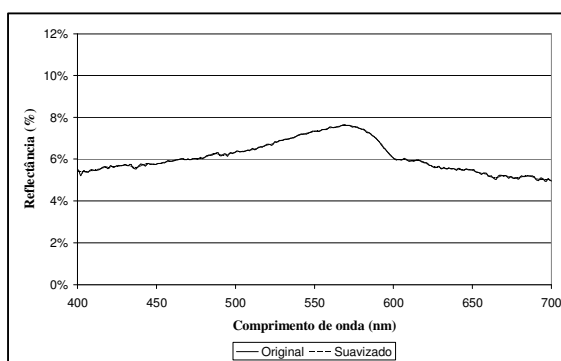


Figura 12 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 14

Tabela 12 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 15

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	566	693	-0,02804	0,10659
Filtro média 3	565	692	-0,02076	0,038045
Filtro média 4	565	700	-0,01927	-0,02917
Filtro média 5	564	700	-0,00941	-0,01299
Filtro média 7	562	700	-0,0043	-0,01519
Filtro média 9	561	700	-0,00058	-0,01436
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>566</b>	<b>693</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>

Na tabela 12 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 566 nm e um pico de absorção em 693 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 566 nm é bastante característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 693 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 13). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itaparanga/SP.

houve uma diminuição na posição dos valores. Os outros filtros testados também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram as demais características.

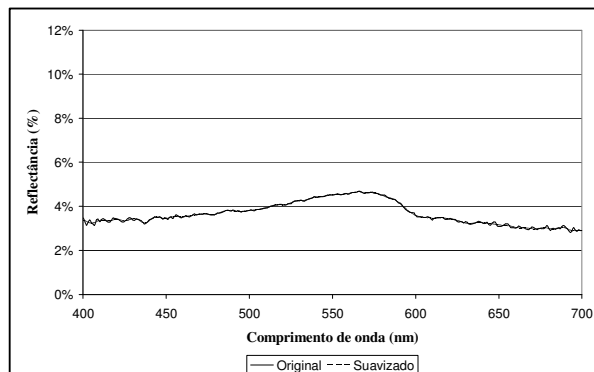


Figura 13 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 15

Tabela 13 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 16

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	570	697	-0,04314156	0,031115972
Filtro média 3	569	700	-0,01813	-0,0321
Filtro média 4	568	700	-0,00673	-0,04009
Filtro média 5	567	700	-0,00315	-0,02281
Filtro média 7	568	700	-0,01039	-0,00279
Filtro média 9	566	700	-0,00403	-0,0229
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>570</b>	<b>700</b>	<b>-0,005</b>	<b>-0,025</b>

Na tabela 13 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 570 nm e um pico de absorção em 697 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 570 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 697 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 14). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que não houve modificação no valor mínimo e ocorreu uma diminuição no módulo do valor máximo.

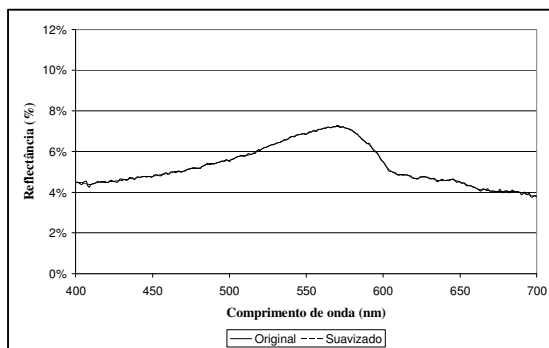


Figura 14 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 16

Tabela 14 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 17**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	571	698	-0,00933	0,016286
<b>Filtro média 3</b>	<b>570</b>	<b>699</b>	<b>-0,00653</b>	<b>0,005297</b>
Filtro média 4	570	698	-0,00585	0,008045
Filtro média 5	569	698	-0,00268	0,006131
Filtro média 7	567	700	-0,00112	-0,00962
Filtro média 9	566	700	-0,00189	-0,00618
Suavização T. Fourier	571	700	-0,005	-0,005

Na tabela 14 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 571 nm e um pico de absorção em 698 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 571 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 698 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição da feição mais aproximada da original e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média com janela 3x3 (Figura 15). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição no valor máximo, ocorrendo um aumento no módulo do mínimo.

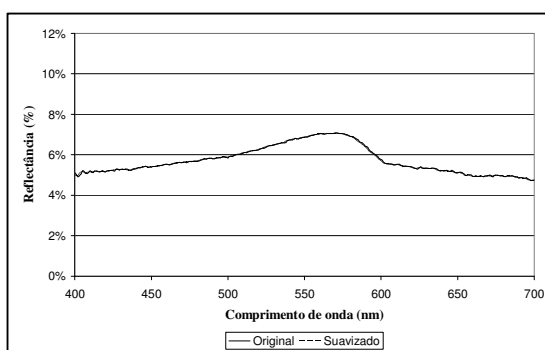


Figura 15 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 17

Tabela 15 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 18**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	569	694	-0,03396278	0,07819959
Filtro média 3	567	693	-0,01471	0,05272
Filtro média 4	567	693	-0,01078	0,034524
Filtro média 5	566	691	-0,00246	0,006156
Filtro média 7	567	690	-0,01118	0,006676
Filtro média 9	565	690	-0,0036	0,002315
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>568</b>	<b>694</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,015</b>

Na tabela 15 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 694 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 571 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 694 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 16).



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo.

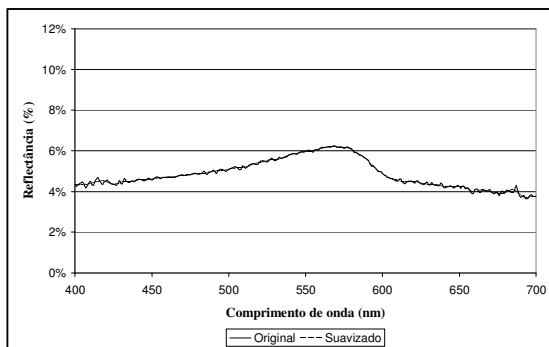


Figura 16 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 18

Tabela 16 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 19**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	566	692	-0,02103	0,076628
Filtro média 3	566	700	-0,01696	-0,02292
Filtro média 4	565	700	-0,00902	-0,04438
Filtro média 5	565	700	-0,00751	-0,01459
Filtro média 7	565	700	-0,00497	-0,01366
Filtro média 9	565	700	-0,00652	-0,00738
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>568</b>	<b>693</b>	<b>-0,005</b>	<b>0,005</b>

Na tabela 16 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 566 nm e um pico de absorção em 692 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 566 nm é bastante característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 692 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 17). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo.

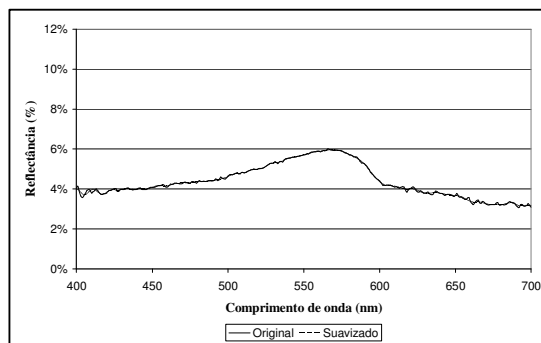


Figura 17 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 19

Tabela 17 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 21**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	569	700	-0,02204	0,015682
Filtro média 3	567	700	-0,00547	0,0000282
Filtro média 4	567	700	-0,00603	-0,00328
Filtro média 5	565	700	-0,00233	0,003431
Filtro média 7	564	699	-0,00346	0,006026
Filtro média 9	562	699	-0,00106	0,006298
<b>Filtro T. Fourier</b>	<b>568</b>	<b>700</b>	<b>-0,005</b>	<b>-0,005</b>

Na tabela 17 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de transformada de Fourier (Figura 18). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram as demais características.

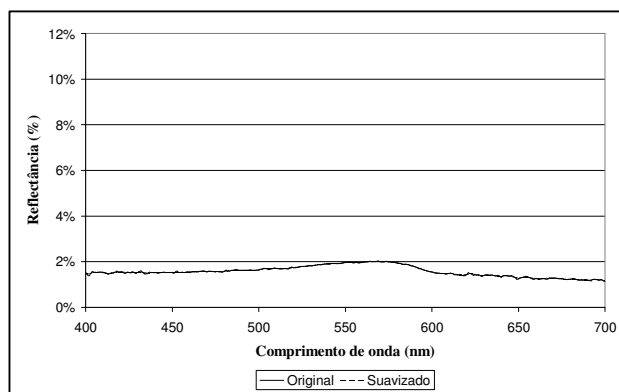


Figura 18 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 21

Tabela 18 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 22**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	569	700	-0,11273	0,20179
Filtro média 3	568	700	-0,04293	0,044221
Filtro média 4	567	699	-0,01154	0,007889
Filtro média 5	566	700	-0,004	0,023506
Filtro média 7	565	700	-0,01183	-0,012026
Filtro média 9	565	700	-0,01182	-0,00159
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>568</b>	<b>700</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,005</b>

Na tabela 18 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de transformada de Fourier (Figura 19). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram as demais características.



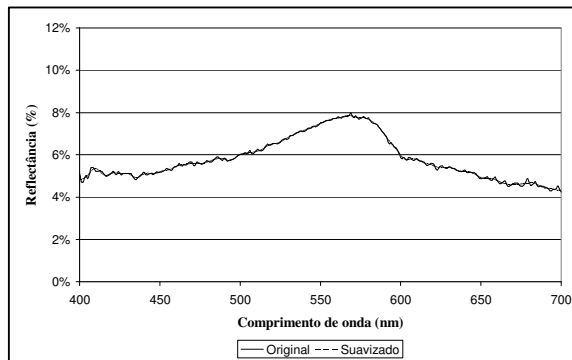


Figura 19 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 22

Tabela 19 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 23

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	569	698	-0,01143	0,012832
Filtro média 3	568	698	-0,0119	0,013219
Filtro média 4	568	698	-0,00998	0,013862
Filtro média 5	567	697	-0,00499	0,007706
Filtro média 7	568	700	-0,01106	-0,01478
Filtro média 9	566	700	-0,00502	-0,00982
<i>Suavização T. Fourier</i>	<b>569</b>	<b>698</b>	<b>0</b>	<b>0,005</b>

Na tabela 19 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 698 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 569 nm é bastante característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 698 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de transformada de Fourier (Figura 20). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram as demais características.

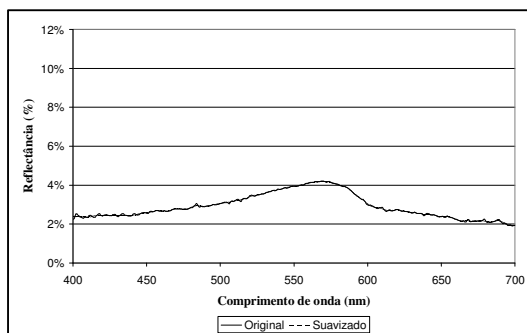


Figura 20 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 23

Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

Tabela 20 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 25

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	572	700	-0,01905	-0,00059
<b>Filtro média 3</b>	<b>571</b>	<b>698</b>	<b>-0,01156</b>	<b>0,003292</b>
Filtro média 4	568	698	-0,00998	0,013862
Filtro média 5	564	700	-0,00376	-0,02589
Filtro média 7	567	700	-0,00428	-0,01161
Filtro média 9	565	700	-0,0023	-0,01159
Suavização T. Fourier	568	700	-0,005	-0,035

Na tabela 20 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 572 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média 3 (Figura 21). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição no valor máximo e um aumento no mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente o de transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.

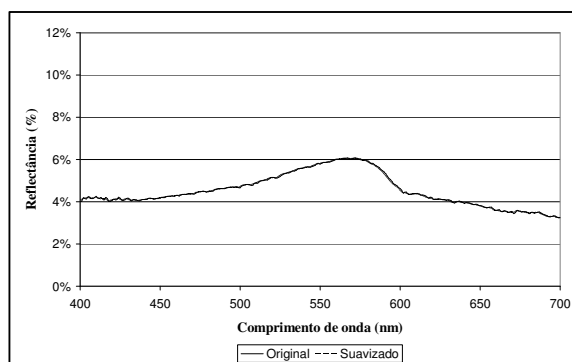


Figura 21 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 25

Tabela 21 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 26

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	569	692	-0,0505	0,304201
<b>Filtro média 3</b>	<b>568</b>	<b>690</b>	<b>-0,02736</b>	<b>0,131668</b>
Filtro média 4	568	689	-0,01873	0,050368
Filtro média 5	567	688	-0,00311	0,03076
Filtro média 7	568	699	-0,00999	0,006673
Filtro média 9	568	700	-0,01485	0,01652
Suavização T. Fourier	571	689	-0,02	0,02

Na tabela 21 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 692 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 569 nm é bastante característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 692 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média com janela 3x3 (Figura 22). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itaparanga/SP.

derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram as demais características.

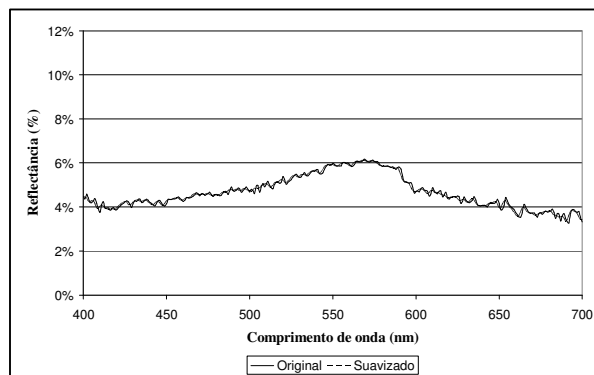


Figura 22 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 26

Tabela 22 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 27**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mínimo (%)
Original	569	690	-0,02132	0,050091
Filtro média 3	569	680	-0,01931	0,013864
Filtro média 4	568	680	-0,00989	0,014979
Filtro média 5	568	679	-0,00935	0,004263
Filtro média 7	568	700	-0,00512	-0,00837
Filtro média 9	564	700	-0,00276	-0,01716
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>570</b>	<b>682</b>	<b>-0,015</b>	<b>0,035</b>

Na tabela 22 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 569 nm e um pico de absorção em 690 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 569 nm é bastante característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 690 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de transformada de Fourier (Figura 23). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram as demais características.

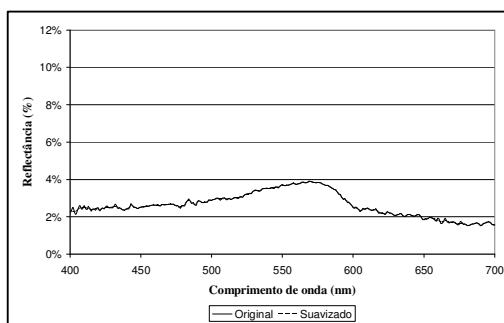


Figura 23 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 27



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

Tabela 23 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 28**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	577	699	-0,04634	0,059723
Filtro média 3	570	698	-0,00941	0,029264
Filtro média 4	570	697	-0,01379	0,016491
Filtro média 5	569	700	-0,00704	-0,01561
Filtro média 7	571	699	-0,00836	-0,00299
Filtro média 9	570	700	-0,01118	-0,03565
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>572</b>	<b>700</b>	<b>-0,005</b>	<b>0</b>

Na tabela 23 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 577 nm e um pico de absorção em 699 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de transformada de Fourier (Figura 24). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição no valor máximo e um aumento no mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente a transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.

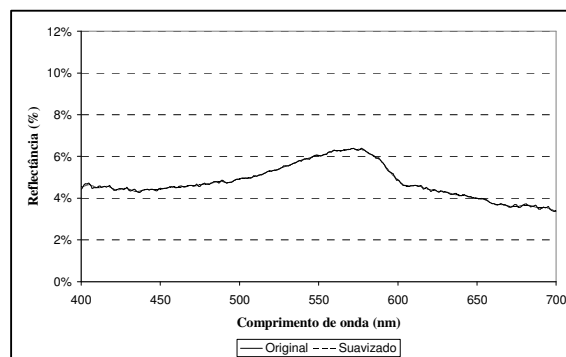


Figura 24 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 28

Tabela 24 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 29**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	575	698	-0,03491	0,027536
Filtro média 3	573	700	-0,01492	-0,01779
Filtro média 4	572	700	-0,01078	-0,01364
Filtro média 5	572	700	-0,01132	-0,03634
Filtro média 7	570	700	-0,0032	-0,03138
Filtro média 9	570	700	-0,0045	-0,02861
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>573</b>	<b>700</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,02</b>

Na tabela 24 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 575 nm e um pico de absorção em 698 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 25). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição no valor máximo e manteve-se igual no valor do mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente o de transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.



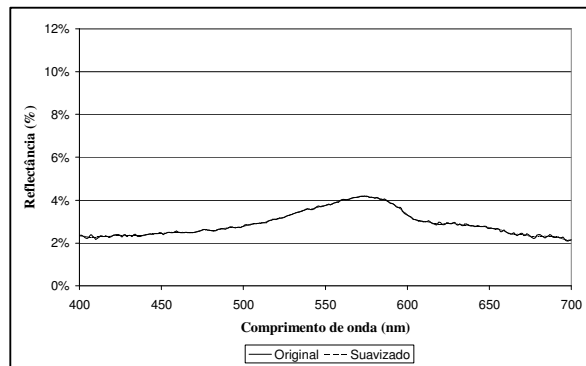


Figura 25 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 29

Tabela 25 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 30

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	572	695	-0,01911	0,030233
<b>Filtro média 3</b>	<b>572</b>	<b>695</b>	<b>-0,02793</b>	<b>0,016668</b>
Filtro média 4	571	700	-0,01697	-0,06887
Filtro média 5	570	700	-0,00703	-0,03529
Filtro média 7	568	700	-0,00294	-0,03248
Filtro média 9	567	700	-0,00527	-0,02187
Suavização T. Fourier	572	697	-0,01	0,005

Na tabela 25 e Figura 50 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 572 nm e um pico de absorção em 695 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 572 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 695 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média com janela 3x3 (Figura 26). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que não houve modificação no valor máximo, ocorrendo uma diminuição no valor mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram as demais características.

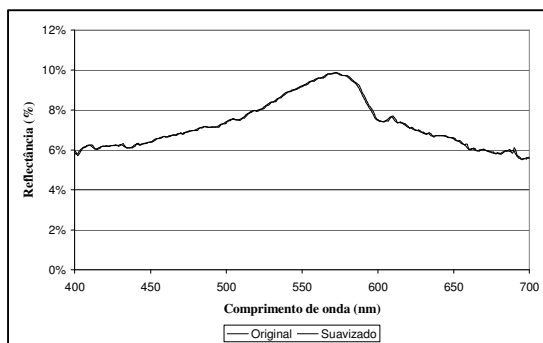


Figura 26 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 30

Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

Tabela 26 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 31

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	563	695	-0,0246	0,022023
Filtro média 3	569	700	-0,00867	-0,03552
Filtro média 4	569	700	-0,00934	-0,01403
Filtro média 5	569	700	-0,00777	-0,0207
Filtro média 7	568	700	-0,00317	-0,01348
<b>Filtro média 9</b>	<b>563</b>	<b>700</b>	<b>-0,0032</b>	<b>-0,01057</b>
Suavização T. Fourier	567	700	0	-0,03

Na tabela 26 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 563 nm e um pico de absorção em 695 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 569 nm é bastante característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005); já o pico de absorção em 695 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média com janela 9x9 (Figura 27). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram as demais características.

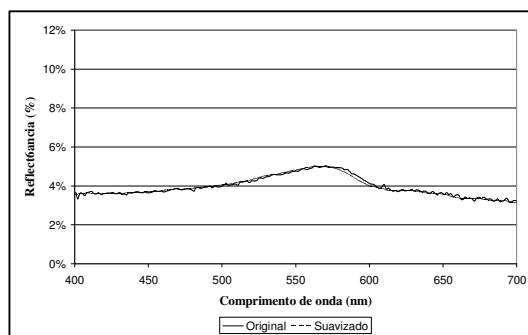


Figura 27 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 31

Tabela 27 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 32

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	580	696	-0,16653	0,038578
Filtro média 3	569	700	-0,00779	0,001937
Filtro média 4	569	700	-0,01282	-0,00341
Filtro média 5	569	700	-0,00778	0,024974
Filtro média 7	569	699	-0,01895	-0,01332
Filtro média 9	568	700	-0,01265	-0,01075
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>572</b>	<b>700</b>	<b>-0,01</b>	<b>0</b>

Na tabela 27 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 580 nm e um pico de absorção em 696 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 580 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994); já o pico de absorção em 696 nm encontra-se um pouco fora do esperado para a presença do pigmento, que seria nos comprimentos de onda de 675 a 680 nm, com o mínimo de absorção ocorrendo em 676 nm, de acordo com Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais próxima da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 28). Analisando-



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itaparanga/SP.

se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma modificação em ambos os valores para menos. Os outros filtros também reduziram o ruído aleatório, porém não preservaram a posição dos comprimentos de onda e alteraram os valores máximo e mínimo.

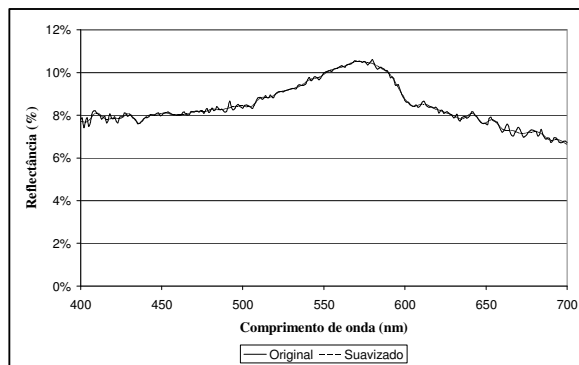


Figura 28 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 32

Tabela 28 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 33

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	572	698	-0,01581	0,0107
Filtro média 3	572	698	-0,01004	0,011325
Filtro média 4	572	697	-0,0092	0,005986
Filtro média 5	571	699	-0,00525	-0,00352
Filtro média 7	568	700	-0,00097	-0,01517
Filtro média 9	568	700	-0,00206	-0,01007
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>572</b>	<b>699</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Na tabela 28 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 572 nm e um pico de absorção em 698 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 29). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente o de transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.

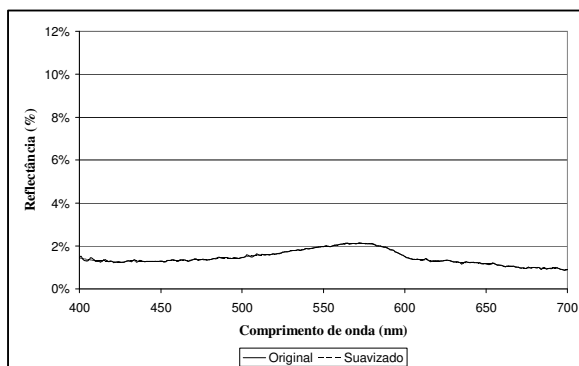


Figura 29 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 33

Tabela 29 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 34**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	574	700	-0,01883	-0,06579
Filtro média 3	572	700	-0,00709	-0,06824
Filtro média 4	572	700	-0,00346	-0,05843
Filtro média 5	573	700	-0,01826	-0,03661
Filtro média 7	571	700	-0,00648	-0,03219
Filtro média 9	570	700	-0,00393	-0,03637
<b>Suavização T. Fourier</b>	<b>574</b>	<b>700</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,06</b>

Na tabela 29 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 574 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi a transformada de Fourier (Figura 30). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição no valor máximo e manteve-se igual no valor do mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente o de transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.

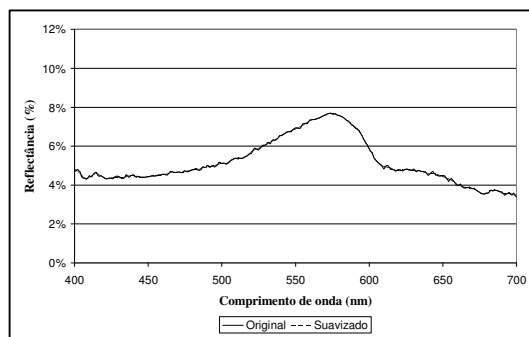


Figura 30 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 34

Tabela 30 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 35**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	572	698	-0,0766	0,051199
<b>Filtro média 3</b>	<b>571</b>	<b>698</b>	<b>-0,04007</b>	<b>0,076204</b>
Filtro média 4	570	697	-0,01861	0,03607
Filtro média 5	569	697	-0,00558	0,013268
Filtro média 7	567	698	-0,00813	0,002126
Filtro média 9	567	698	-0,00367	0,006699
Suavização T. Fourier	572	700	-0,005	0

Na tabela 30 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 572 nm e um pico de absorção em 698 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média 3 (Figura 31). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição no valor máximo e aumento no valor do mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente a suavização por transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.



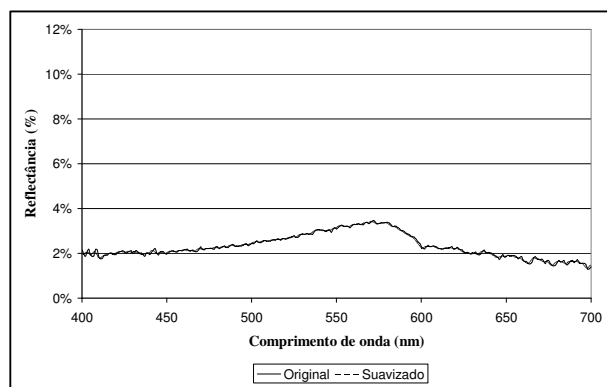


Figura 31 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 35

Tabela 31 – Impacto da suavização sobre as medidas do ponto 36

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	571	700	-0,0451	-0,0328
<b>Filtro média 3</b>	<b>570</b>	<b>700</b>	<b>-0,0319</b>	<b>0,0190</b>
Filtro média 4	570	700	-0,0234	-0,0140
Filtro média 5	569	700	-0,0093	-0,0393
Filtro média 7	566	700	-0,0071	-0,0555
Filtro média 9	565	700	-0,0028	-0,0506
Suavização T. Fourier	569	700	-0,015	-0,02

Na tabela 31 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 571 nm e um pico de absorção em 700 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média 3 (Figura 32). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição em ambos os valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, principalmente o de transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.

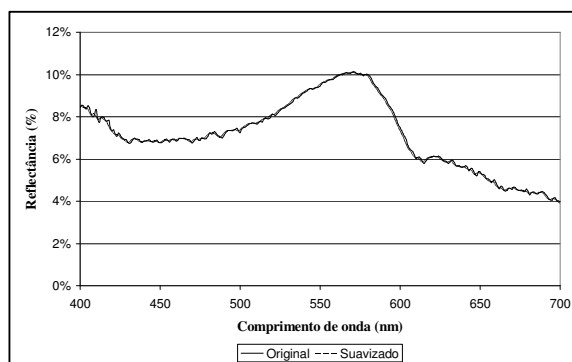


Figura 32 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 36

Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

Tabela 32 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 104**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	576	402	-0,01324	-0,04253
<b>Filtro média 3</b>	<b>575</b>	<b>402</b>	<b>-0,01307</b>	<b>0,022732</b>
Filtro média 4	574	402	-0,0081	0,20765
Filtro média 5	573	402	-0,00421	0,010954
Filtro média 7	572	403	-0,00516	0,013837
Filtro média 9	572	402	-0,00109	0,007264
Suavização T. Fourier	576	406	-0,01	0,005

Na tabela 32 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 575 nm e um pico de absorção em 402 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 576 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994); já o pico de absorção em 400 nm encontra-se aquém do previsível para esse pigmento, onde a absorção deveria apresentar um mínimo em 438 nm, de acordo com Barbosa (2005); embora seja reconhecido como havendo a presença do fitoplâncton por Kirk (1994), que apresenta o intervalo de absorção entre 400 e 515 nm. O filtro de suavização que manteve a posição da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi o de média 3 (Figura 33). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que não houve modificação para o máximo e houve modificação no mínimo para menos. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, a maioria deles preservou a posição dos comprimentos de onda e alguns valores de máximo apresentaram-se bem próximos do valor da curva original, porém o filtro de transformada de média 3 foi mais eficiente na remoção do ruído aleatório.

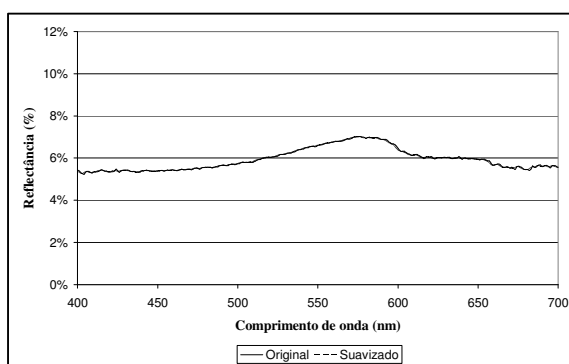


Figura 33 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 104

Tabela 33 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 111**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	582	410	-0,04617	0,218084
<b>Filtro média 3</b>	<b>581</b>	<b>409</b>	<b>-0,02178</b>	<b>0,123528</b>
Filtro média 4	579	435	-0,00141	0,008889
Filtro média 5	578	435	-0,01452	0,011786
Filtro média 7	578	434	-0,01241	0,011587
Filtro média 9	575	434	-0,00355	0,019292
Suavização T. Fourier	584	437	-0,005	0,005

Na tabela 33 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 582 nm e um pico de absorção em 410 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 582 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994); já o pico de absorção em 410 nm encontra-se aquém do



## Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

previsível para esse pigmento, onde a absorção deveria apresentar um mínimo em 438 nm, de acordo com Barbosa (2005); embora seja reconhecido como havendo a presença do fitoplâncton por Kirk (1994), que apresenta o intervalo de absorção entre 400 e 515 nm. O filtro de suavização que manteve a posição da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi o de média 3 (Figura 34). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que ocorreu diminuição dos valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, a maioria deles preservou a posição dos comprimentos de onda e alguns valores de máximo apresentaram-se bem próximos do valor da curva original, porém o filtro de transformada de média 3 foi mais eficiente na suavização.

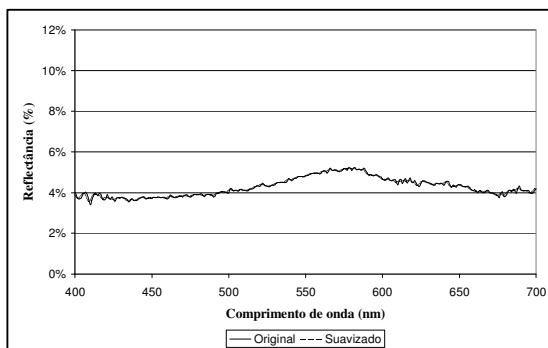


Figura 34 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 111

Tabela 34 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 117**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	579	426	-0,0205343	0,052873596
Filtro média 3	583	435	-0,011	0,005527
Filtro média 4	582	435	-0,00569	0,004257
Filtro média 5	581	435	-0,00378	0,005427
Filtro média 7	578	435	-0,00367	0,004938
<b>Filtro média 9</b>	<b>578</b>	<b>431</b>	<b>-0,00651</b>	<b>0,00321</b>
Suavização T. Fourier	581	437	0	0

Na tabela 34 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 579 nm e um pico de absorção em 426 nm (para a curva original). O pico de reflectância em 579 nm é característico de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994); já o pico de absorção em 426 nm encontra-se bastante próximo do esperado para esse pigmento, onde a absorção deveria apresentar um mínimo em 438 nm, de acordo com Barbosa (2005); embora seja reconhecido como havendo a presença do fitoplâncton por Kirk (1994), que apresenta o intervalo de absorção entre 400 e 515 nm. O filtro de suavização que manteve a posição da feição apesar de reduzir o ruído aleatório foi o de média 9 (Figura 35). Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve modificação para menos dos valores máximo e mínimo. Os demais filtros também reduziram o ruído aleatório, porém o filtro de média 9 foi mais eficiente na suavização.



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itapararanga/SP.

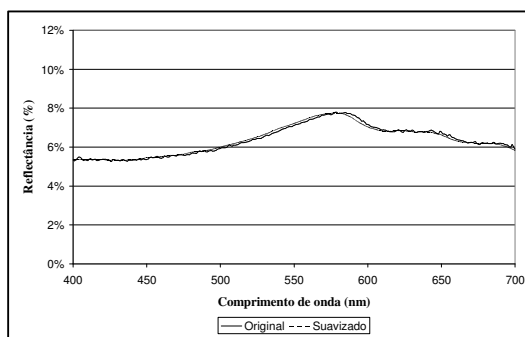


Figura 35 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 117

Tabela 35 – Impacto da suavização sobre as medidas do **ponto 129**

Filtros (400-700 nm)	$\lambda$ máx. (nm)	$\lambda$ mín. (nm)	Valor máx. (%)	Valor mín. (%)
Original	581	676	-0,00267	0,126078
<b>Filtro média 3</b>	<b>580</b>	<b>696</b>	<b>-0,0122</b>	<b>0,068729</b>
Filtro média 4	580	700	-0,02838	-0,07067
Filtro média 5	580	700	-0,04037	-0,0603
Filtro média 7	577	700	-0,00185	-0,03734
Filtro média 9	576	700	-0,01513	-0,06279
Suavização T. Fourier	581	700	-0,02	-0,02

Na tabela 35 observa-se um pico de reflectância no comprimento de onda igual a 581 nm e um pico de absorção em 676 nm (para a curva original). Os picos de reflectância e absorção são característicos de presença de fitoplâncton, segundo Kirk (1994) e Barbosa (2005). O filtro de suavização que manteve a posição mais aproximada da feição e ainda assim reduziu o ruído aleatório foi o de média 3 (Figura 36).

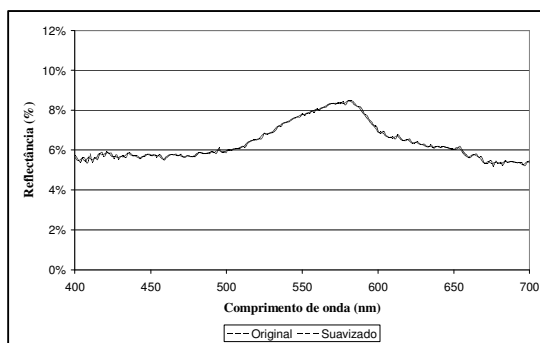


Figura 36 – Efeito da aplicação da suavização sobre o espectro do ponto 129

Analisando-se os valores máximo e mínimo a partir do módulo da primeira derivada verifica-se que houve uma diminuição no valor máximo e no mínimo. Os demais filtros também suavizaram o ruído aleatório, principalmente a suavização por transformada de Fourier, porém não preservaram as demais características.

Analisando os gráficos e as tabelas observa-se que ocorre comportamentos diferentes em cada suavização para as curvas espectrais avaliadas. E que para cada caso deve-se usar um filtro de suavização específico, que não altere de modo significativo nem a posição (máximo e mínimo da curva) nem o módulo da derivada primeira.



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP.

---

A figura 37 apresenta as curvas de reflectância suavizadas para as 35 amostras coletadas em campo.

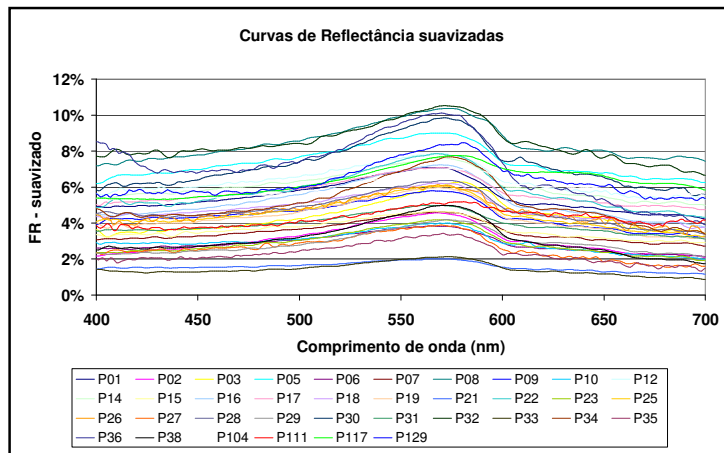


Figura 37 - Curvas de Reflectância suavizadas para as 36 amostras de campo



**APÊNDICE C – EXTRAÇÃO DOS VALORES DE REFLECTÂNCIA APARENTE  
PARA AS IMAGENS MULTIESPECTRAIS IKONOS DE FEVEREIRO E MARÇO  
DE 2007**



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP.

Tabela 1 - Valores de reflectância aparente extraídos da imagem Ikonos fevereiro 2007 para toda a área disponível do reservatório de Itupararanga/SP

<b>Pontos</b>	<b>B1 (azul)</b>	<b>B2 (verde)</b>	<b>B3 (vermelho)</b>	<b>B4 (infra-vermelho)</b>
P01	0,141425	0,163916	0,076388	0,027773
P02	0,146392	0,158417	0,075131	0,024478
P03	0,123893	0,145703	0,069787	0,047543
P05	0,137334	0,152232	0,066643	0,021183
P06	0,1429	0,1505	0,0698	0,0066
P07	0,113958	0,130926	0,06067	0,013651
P08	0,14873	0,162885	0,081732	0,036246
P09	0,14347	0,149139	0,074188	0,019771
P10	0,113373	0,109621	0,059099	0,024007
P12	0,135581	0,157386	0,073245	0,031068
P14	0,174735	0,179036	0,083618	0,021183
P15	0,159541	0,176974	0,083304	0,027773
P16	0,088537	0,121648	0,060985	0,041424
P17	0,162463	0,175599	0,078589	0,017417
P18	0,170352	0,182128	0,082675	0,022124
P19	0,239312	0,271131	0,173838	0,095557
P21	0,339828	0,394471	0,286314	0,191951
P104	0,191975	0,204566	0,139726	0,022885
P111	0,665047	0,769509	0,698319	0,794426
P117	0,494402	0,566989	0,437268	0,298902
P129	0,201033	0,219908	0,159687	0,025687
P34	0,208923	0,21718	0,11191	0,058841
P35	0,220319	0,222678	0,105623	0,040953
P11	0,109867	0,1374	0,06612	0,047638
P04	0,160418	0,181723	0,07766	0,014011
P43	0,174151	0,151038	0,092631	0,033626
P59	0,169184	0,1742	0,1001	0,0238
P46	0,171229	0,195361	0,097933	0,056978
P58	0,226455	0,223318	0,135048	0,041566
P48	0,21389	0,214794	0,125067	0,044368
P53	0,234344	0,235933	0,145028	0,079396
P65	0,260058	0,26389	0,167172	0,050907
P63	0,381905	0,462319	0,366781	0,217638
P69	0,284603	0,316395	0,182143	0,055577



Desenvolvimento de Método para Inferência de Características Físicas da Água Associadas às Variações Espectrais. Caso de Estudo: Reservatório de Itupararanga/SP.

---

P78	0,283434	0,432316	0,270096	0,045302
P70	0,203371	0,217863	0,147523	0,103682
P83	0,135873	0,128536	0,073918	0,006071
P92	0,125646	0,136718	0,0892	0,049973
P95	0,132074	0,1374	0,089512	0,010742
P101	0,222948	0,259117	0,175282	0,052775
P103	0,147853	0,16263	0,097309	0,017747
P108	0,156327	0,197406	0,135672	0,053709
P109	0,195482	0,171154	0,130681	0,049039
P114	0,361743	0,417656	0,298166	0,120962
P124	0,234344	0,25298	0,16842	0,029423
P127	0,230546	0,248548	0,178712	0,035028
P128	0,21126	0,232182	0,163742	0,025687
P130	0,212721	0,245138	0,169979	0,057445
P134	0,246032	0,263208	0,190876	0,065852
P135	0,212137	0,237978	0,167484	0,024753
P151	0,184086	0,220931	0,173098	0,067253
P138	0,369925	0,442203	0,339959	0,136841
P141	0,325803	0,352535	0,260115	0,056978
P145	0,269993	0,318441	0,237971	0,071456
P149	0,242234	0,276505	0,221441	0,061649
P117	0,494402	0,566989	0,437268	0,298902
P122	0,243695	0,305826	0,249823	0,107885



Tabela 2 - Valores de reflectância aparente extraídos da imagem Ikonos março de 2007 disponíveis para a região oeste do reservatório de Itupararanga/SP

<b>Pontos</b>	<b>B1 (azul)</b>	<b>B2 (verde)</b>	<b>B3 (vermelho)</b>	<b>B4 (infra-vermelho)</b>
P01	0,117861	0,147230	0,055862	0,009236
P02	0,106393	0,139738	0,052777	0,010263
P03	0,113083	0,153974	0,058946	0,017447
P05	0,107349	0,136741	0,053805	0,011802
P06	0,104482	0,143859	0,053120	0,004618
P07	0,105756	0,145357	0,054491	0,008210
P08	0,118179	0,158095	0,063401	0,013342
P09	0,101934	0,145732	0,054148	0,009236
P10	0,109579	0,147605	0,057918	0,010776
P12	0,106712	0,135991	0,051749	0,012315
P14	0,109579	0,142735	0,058603	0,004618
P15	0,106712	0,143109	0,056890	0,009750
P16	0,095563	0,162590	0,115836	0,013342
P17	0,113720	0,148354	0,058260	0,006671
P18	0,147167	0,156222	0,063058	0,009750
P19	0,149078	0,188065	0,101442	0,021552
P23	0,086006	0,119508	0,050721	0,018986
P27	0,104800	0,143484	0,054148	0,007697
P34	0,147167	0,167461	0,073340	0,009750
P35	0,128054	0,155472	0,067514	0,010263
P11	0,113401	0,143484	0,055862	0,020012
P04	0,127098	0,146856	0,058260	0,009750
P29	0,075495	0,094407	0,055176	0,078510
P43	0,088236	0,106770	0,043181	0,005131
P59	0,086325	0,105272	0,044552	0,004618
P46	0,096837	0,124003	0,053805	0,018473
P58	0,008887	0,103024	0,042496	0,009236
P48	0,090466	0,104148	0,046266	0,004618
P33	0,032173	0,044207	0,030501	0,088773

