

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E  
METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**GUSTAVO RODRIGUES TONIOLO**

**IDENTIFICAÇÃO DE CONSTITUINTES OPTICAMENTE  
ATIVOS NA ÁGUA DO LAGO GUAÍBA, A PARTIR DE DADOS  
DE SENSORES ORBITAIS E ESPECTRORRADIOMETRIA DE  
CAMPO**

Porto Alegre

2016

**GUSTAVO RODRIGUES TONIOLO**

**IDENTIFICAÇÃO DE CONSTITUINTES ÓPTICAMENTE  
ATIVOS NA ÁGUA DO LAGO GUAÍBA, A PARTIR DE DADOS  
DE SENSORES ORBITAIS E ESPECTRORRADIOMETRIA DE  
CAMPO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Área de concentração: Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento

**ORIENTADOR: Laurindo Antonio Guasselli**

**CO-ORIENTADOR: Waterloo Pereira Filho**

Porto Alegre

2016

## CIP - Catalogação na Publicação

Toniolo, Gustavo Rodrigues  
Identificação de Constituintes Opticamente Ativos  
na Água do Lago Guaíba, A Partir de Dados de Sensores  
Orbitais e Espectrorradiometria de Campo / Gustavo  
Rodrigues Toniolo. -- 2016.  
103 f.

Orientador: Laurindo Antonio Guasselli.  
Coorientador: Waterloo Pereira Filho.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em  
Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-  
Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-  
RS, 2016.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Lago Guaíba. 3.  
Espectrorradiometria. 4. Limnologia. 5. Sensores  
orbitais. I. Guasselli, Laurindo Antonio, orient.  
II. Pereira Filho, Waterloo, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

GUSTAVO RODRIGUES TONIOLO

IDENTIFICAÇÃO DE CONSTITUINTES OPTICAMENTE  
ATIVOS NA ÁGUA DO LAGO GUAÍBA, A PARTIR DE DADOS  
DE SENSORES ORBITAIS E ESPECTRORRADIOMETRIA DE  
CAMPO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Sensoriamento Remoto e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul -  
Porto Alegre - Brasil

Coorientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho, UFSM  
Doutor pela Universidade de São Paulo, São Paulo - Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira - UNIVATES  
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Rosana Corazza, IFRS – Campus Sertão  
Doutora pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr<sup>a</sup>. Tatiana Mora Kuplich, CRS/INPE  
Doutora pela University of Southampton, Southampton, Inglaterra.

Coordenador do PPGSR: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. (Nome do Coordenador do PPGEE)

Porto Alegre, (agosto de 2016)

## AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais, Gilberto Bordin Toniolo e Ladi Rodrigues Toniolo por todo apoio, ensinamentos, e pelo investimento que propiciou o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus irmãos, Giovana Rodrigues Toniolo e Giuliano Rodrigues Toniolo pelas ajudas, companheirismo e apoio em todas as etapas deste curso. As minhas primas de Cachoeirinha e família, Lucimara, Medianeira e Eunice pela amizade, carinho por me acolherem em sua residência. E ao meu grande primo Franco, pelo companheirismo e em dividir o apto comigo em Poa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, PPGSR, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa. E à CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

Ao meu orientador Laurindo Antonio Guasselli, pela orientação, confiança e padecer a minha calma. E meu coorientador Waterloo Pereira Filho, por sempre ter me garantido muitas oportunidades e valorizado meu potencial, muito obrigado!

Aos queridos *Sensorientos*: Diniz Carvalho e Virindiana Bortolotto, por sempre estarmos juntos, pelos xis moita e conversas cabeça que tivemos e ainda temos no What'sApp; a Paola Ramos pela grande amizade, momentos de diversão e pela hospedagem; Ao Luis Fernando Chimelo, grande amigo, agradeço pelos momentos de descontração em laboratório e a parceria; A marmota Alice Fassoni, amiga, obrigado pelo auxílio no campo e por todas as pizzinhas juntos. A colombiana Tatiana Reyes, o maranhense Thiago Diniz, ao Mauro Nóbrega, a Elen Lima, ao Mauricio Souza, a Adriana Moreira e a Diana Fiori, com os quais tive a oportunidade de compartilhar todo tipo de sentimento e experiência, agradeço pela amizade.

Aos amigos do LAGAM, em especial ao Glênio da Luz pela amizade e parceria no desenrolar e no enrolar deste trabalho. A amiga Daniela Rocha que enlouqueceu com o Glênio e com aquela caralhada de dados, e pelas brincadeiras de laboratório. E aos meu amig@s de proza e roles pela CB: Renata Quevedo, Cecilia Etchelar, Camilo Carneiro, Tássia Belloti e João Brubacher.

Aos meus amigos queridos do LABGEOTEC, que sempre juntos nos auxiliamos, aturamos, festejamos: Joceli Augusto Gross, que esteve comigo em várias etapas na minha vida e sempre ter me ajudado, te adoro cara! Ao Douglas Facco, meu best, agradeço cada segundo contigo, nossas horas juntos são sempre vivas. Ao Willian Gaida grande amigo, vários jacks juntos e papos cabeça; A Eliege Buffon, por dividir comigo as horas de humor e de desespero; ao Felipe Correa 'Potter', pela amizade e auxílio em campo e em laboratório! E as minhas bests Patrícia Trindade e Greice Silveira, que sempre estivemos juntos duplicando nossas alegrias e dividimos nossas tristezas dentro e fora da academia! Amo todos vcs!

E a todos amigos que influenciaram de uma forma ou de outra em minhas escolhas na vida.

*Não faça do hábito um estilo de vida. Ame a novidade. Tente o novo todo dia. O novo lado, o novo método, o novo sabor, o novo jeito, o novo prazer, o novo amor. A nova vida. Tente.*

*(Clarice Lispector) #Dropsdobem #espalheobem*

## RESUMO

### IDENTIFICAÇÃO DE CONSTITUINTES OPTICAMENTE ATIVOS NA ÁGUA DO LAGO GUAÍBA, A PARTIR DE DADOS DE SENSORES ORBITAIS E ESPECTRORRADIOMETRIA DE CAMPO

O Lago Guaíba é um importante corpo d'água localizado na porção leste do estado do Rio Grande do Sul. É a principal fonte de abastecimento de água para a região metropolitana de Porto Alegre, além de exercer outras funções sociais primordiais, como de estocar água para usos futuros, abastecimento agrícola e industrial, navegação, entre outros. Com os recentes avanços na tecnologia de Sensoriamento Remoto, espectrorradiômetros com altíssima resolução espectral e radiométrica são cada vez mais utilizados na discriminação de diferentes elementos presentes na natureza. Paralelamente, estão os sensores orbitais que possibilitam, por meio de sua visão sinótica, ampliar a representatividade espacial dos elementos na superfície terrestre. Este trabalho tem como objetivo caracterizar as águas do Lago Guaíba, quanto as suas propriedades ópticas, a partir da integração de dados de sensoriamento remoto orbital e de espectrorradiometria de campo. Para tanto foram coletadas variáveis limnológicas (totais de sólidos em suspensão, clorofila-*a*, turbidez) e espectrais em 9 de fevereiro de 2015, utilizando uma rede de 25 estações de coleta sobre o Lago, e adquiridos dados complementares: precipitação pluviométrica e direção de ventos. Foi utilizada uma série temporal da banda 4, sensor OLI/Landsat-8, e estabelecida correlação entre precipitação e reflectância. Foram adquiridos espectros com o espectrorradiômetro e aplicadas técnicas de suavização, derivada e remoção do contínuo, buscando identificar os constituintes opticamente ativos que determinam as características da água. As variáveis limnológicas foram espacializadas e relacionadas com os dados espectrais por meio de correlações e modelos de dispersão. Uma imagem do sensor LISS-III/ResourceSat-2 foi utilizada para estimativa empírica dos parâmetros limnológicos. Os resultados mostraram que a precipitação de 16 dias anteriores à aquisição da imagem influencia de forma significativa nas características ópticas da água em diferentes épocas do ano. A máxima reflectância da água foi na faixa espectral do verde (0,18%). As regiões onde se observou as maiores reflectâncias na série estão ligadas aos ambientes onde predominam condições de erosão ou não deposição de sedimentos finos. Regressões empíricas explicaram que 23% da reflectância em 708 nm é devida a presença de sólidos na água. A concentração de Chl-*a* não apresentou correlações significativas ( $\alpha = 0,05$ ) com a reflectância. A análise dos dados espectrais demonstrou que os dois métodos de derivada e remoção do contínuo apresentaram bons resultados. Observou-se o aumento das correlações após a derivação evidenciando que esta técnica aumenta o contraste espectral e assim a precisão das estimativas. A primeira derivada em 772 nm explicou 44% da variação devido ao totais de sólidos em suspensão. Já em 690 nm, a primeira derivada explicou 32% da variação na concentração de clorofila-*a*. Os melhores resultados foram observados nas variáveis turbidez e transparência. A partir da remoção do contínuo se verificou as maiores profundidades de bandas em comprimentos de onda mais longos. Correlações fortes foram encontradas para as variáveis turbidez e transparência ( $r = 0,86$  e  $-0,86$ , respectivamente) na faixa de 690-750 nm. Devido à baixa concentração tanto de sólidos em suspensão quanto de clorofila-*a*, houve dificuldade no estabelecimento de relações fiáveis entre parâmetros espectrais e a qualidade da água do Lago Guaíba. As imagens LISS-III mostraram-se potenciais para mapear a composição da água do Lago Guaíba.

**Palavras-chaves:** Sensoriamento Remoto da água; Lago Guaíba; Limnologia.

## ABSTRACT

### IDENTIFICATION OF OPTICALLY ACTIVE CONSTITUENTS IN WATER FROM THE GUAIBA LAKE, FROM ORBITAL DATA SENSORS AND FIELD SPECTRORADIOMETRY

Guaíba Lake is an important body of water located in the east portion of Rio Grande do Sul. It is the main source of water supply to Porto Alegre metropolitan region, besides exercising other primary social functions such as storing water for future use, agricultural and industrial supply, shipping, among others. With the recent advancements in technology of Remote Sensing, spectroradiometers with the highest spectral and radiometric resolution are each time more used to the distinction of different elements presented in nature. In parallel, there are the orbital sensors, which allow, through its synoptic view, to amplify the spatial representativity of the elements on earth's surface. This work aims to characterize the waters of Guaíba Lake- RS, in terms of its optical properties, from the data integration of remote orbital sensing and spectroradiometry of the area. To achieve this, limnologic (total of suspended solids, chlorophyll-*a*, and turbidity) and spectral variables were collected on February 9<sup>th</sup> 2015, by the use of a 25 station collection network on the lake, and acquired complementary data: rain fall and wind direction. One temporal series of band 4 and sensor OLI/Landsat 8 were used, and the correlation between rain falls and reflectance was established. Spectra were acquired with the spectroradiometer and smoothing, derivation and continuum removal techniques were applied in order to identify the optically active constituents which determine the characteristics of the water. The limnologic variables were spatialized and related to the spectral data by correlations and dispersion models. An image of the sensor LISS-III/ResourceSat-2 was used for the empirical estimation of the limnologic parameters. The results showed that the 16 days rain falls previous to the image acquisition influenced in a significant way in the optical characteristics of the water in different seasons of the year. The maximum reflectance of water was in the green spectral range (0, 18%). The regions where the highest reflectance in the series was observed are connected to the environments where prevail the erosion conditions or nondeposition of fine sediments. Empirical regressions explained that 23% of the reflectance in 708 nm is due to the presence of solids in the water. The concentration of Chl-*a* did not present significant correlations ( $\alpha = 0, 05$ ) with the reflectance. The analysis of spectral data showed that the two methods of derivation and continuum removal presented positive results. The increase of correlations after the derivation was observed, highlighting the fact that this technique increases the spectral contrast and so the estimation accuracy. The first derivation in 772 nm explained 44% of the variation in the concentration of chlorophyll-*a*. The best results were observed in the variables TUR and DS. From the removal of the continuum, the highest band depth was verified in longer wavelength. Strong correlations were found to the turbidity and transparency variables ( $r = 0,86$  and  $-0,86$ , respectively) in the range of 690-750 nm. Due to low concentration of suspended solids as much as chlorophyll-*a*, there was difficulty in the establishment of reliable relations between the spectral parameters and the quality of water in Guaíba River. The images LISS-III showed themselves to be potentials to map Guaíba River's composition.

**Key words:** Remote sensing of water; Guaíba Lake; Limnology; Spectroradiometry.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 1 - Radiância total que é registrada por um sensor saindo de um corpo d'água. <b>Esun</b> é a irradiância do sol e <b>Es<sub>ky</sub></b> é da atmosfera. Fonte: JENSEN (2011).</i>   | 21 |
| <i>Figura 2 - Coeficiente de absorção (a) de dispersão (b) e atenuação (c) para água pura. Fonte: Dekker (1993).</i>  | 23 |
| <i>Figura 3 - Coeficiente de absorção das substâncias húmicas em função do comprimento de onda. Fonte: Dekker (1993).</i>   | 25 |
| <i>Figura 4 - Reflectância espectral da água com vários níveis de concentração de sedimentos em suspensão do tipo argiloso, em (a), e siltooso em (b). Fonte: Adaptado de Jensen (2011).</i>  | 26 |
| <i>Figura 5 - Porcentagem de reflectância de água clara e de água com algas com base em medidas in situ feitas com espectrorradiômetro. Fonte: HAN (1997) e JENSEN (2009).</i>  | 27 |
| <i>Figura 6 - Reflectância da superfície da água com variações na concentração de clorofila, experimento "a" e "b". Fonte: Rundquist et al. (1996).</i>   | 28 |
| <i>Figura 7 - Picos de derivada.</i>  | 31 |
| <i>Figura 8 - Espectro de laboratório de calcita mostrando o contínuo ajustado (Fitted Continuum). Fonte: Kruse et al., 1993.</i>   | 33 |
| <i>Figura 9 - Espectro de calcita com o contínuo removido mostrando os parâmetros da banda de absorção: 1) posição da banda (position); 2) profundidade de banda (depth); e 3) largura à meia altura (FWHM). Fonte: Kruse et al., 1993.</i> | 34 |
| <i>Figura 10 - Fluxograma metodológico</i>  | 40 |
| <i>Figura 11 - Localização do Lago Guaíba no Estado do Rio Grande do Sul e Brasil.</i>  | 43 |
| <i>Figura 12 - Classificação de imagem OLI/Landsat-8 para definição de compartimentos aquáticos e das estações de coleta.</i>   | 45 |
| <i>Figura 13 - Esquema com identificação das estações de coleta no Lago Guaíba.</i>   | 46 |
| <i>Figura 14 - Exemplo de reflectância e primeira derivada. Fonte: trabalho de campo.</i>   | 50 |
| <i>Figura 15 - Bandas de absorção (A, B, C e D) no espectro de reflectância da EC GB01 e espectro normalizado após remoção da linha do contínuo. Fonte: Trabalho de campo.</i>  | 51 |
| <i>Figura 16 - Imagem LISS-III/ResourceSat-2 do dia 08 de fevereiro de 2015, composição RGB432. (Orbita/Ponto: 328/100).</i>  | 53 |
| <i>Figura 17 - Termopluviogramas de precipitação pluviométrica mensal acumulada, Porto Alegre - RS.</i>   | 57 |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 18 - Relação entre a reflectância média da água (no Lago inteiro) e dados de precipitação acumulados médios nos 16 dias anteriores a aquisição das mesmas. Fonte: INMET (2014;2015) e USGS.....</i>                                    | <i>59</i> |
| <i>Figura 19 - Precipitação pluviométrica nos 16 dias anteriores a coleta de campo (09/02/2015) e a passagem dos satélites.....</i>  | <i>60</i> |
| <i>Figura 20 - Variação espaço-temporal da reflectância na banda 4 do sensor OLI/Landsat-8, direção e intensidade dos ventos em km/h e precipitação acumulada 16 dias anteriores ao imageamento. Fonte: USGS; INMET, 2015.....</i>               | <i>63</i> |
| <i>Figura 21 - Teste estatístico de normalidade Shapiro-Wilk, para as amostras limnológicas. 65</i>  |           |
| <i>Figura 22 - Distribuição espacial da clorofila-a (<math>\mu\text{g/L}</math>) em 09 de Fev. de 2015, Lago Guaíba. ....</i>  | <i>67</i> |
| <i>Figura 23 - Distribuição espacial da transparência (cm), em 09 de fev. de 2015, Lago Guaíba. ....</i>   | <i>68</i> |
| <i>Figura 24 - Distribuição espacial dos totais de sólidos em suspensão, em 09 de Fev. de 2015, Lago Guaíba. ....</i>  | <i>69</i> |
| <i>Figura 25 - Distribuição espacial da Turbidez (NTU), em 09 de fev. de 2015, Lago Guaíba. 70</i>   |           |
| <i>Figura 26 - Resultado da suavização no espectro da estação amostral GB07. Tamanho do filtro = 7 pontos.....</i>   | <i>71</i> |
| <i>Figura 27 - Espectros de reflectância da água medidos pelo espectrorradiômetro FieldSpec® HandHeld nas 25 estações de coleta, campanha de campo em 09 de fevereiro de 2016, Lago Guaíba. ....</i>   | <i>73</i> |
| <i>Figura 28 - Correlograma entre as variáveis limnológicas com valores de reflectância nos diferentes comprimentos de onda. A linha tracejada indica o limite dos valores estatisticamente significativos, <math>\alpha = 0,05</math>).....</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura 29 - Diagramas de dispersão entre as variáveis limnológicas Chl-a, TSS, TUR e DS e reflectância em 706, 708 e 709 nm, respectivamente.....</i>   | <i>76</i> |
| <i>Figura 30 - a) espectro de reflectância; b) primeira derivada dos dados de reflectância e c) segunda derivada.....</i>  | <i>78</i> |
| <i>Figura 31 – Correlação das variáveis limnológicas com primeira derivada nos diferentes comprimentos de onda.....</i>  | <i>80</i> |
| <i>Figura 32 - Diagrama de dispersão entre as variáveis transparência (cm) e turbidez (NTU) e a primeira derivada em 670 nm. ....</i>  | <i>80</i> |
| <i>Figura 33 - Correlograma entre totais de sólidos em suspensão e curvas de primeira e segunda derivada espectral. ....</i>   | <i>81</i> |

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 34 - Diagrama de dispersão entre a variável TSS e a primeira derivada em 772 nm.</i>  | 82 |
| <i>Figura 35 - Correlograma de concentração de clorofila-a com a primeira e segunda derivada do espectro de reflectância.....</i>   | 83 |
| <i>Figura 36 - Diagramas de dispersão entre a variável clorofila-a e a primeira derivada em 690 nm e clorofila-a e segunda derivada em 670 nm.....</i>  | 84 |
| <i>Figura 37 - Espectros do contínuo removidos para o intervalo de comprimento de onda de 400 a 900 nm. ....</i>  | 85 |
| <i>Figura 38 - Profundidade de banda de absorção para as diferentes estações amostrais. ....</i>  | 87 |
| <i>Figura 39 – Correlograma da remoção do contínuo para os diferentes comprimentos de onda com as variáveis limnológicas.....</i>   | 88 |
| <i>Figura 40 – Diagramas de dispersão entre a concentração de clorofila-a e a reflectância normalizada em 689 nm e profundidade de banda na faixa de 648 – 690 nm para todas estações amostrais. ....</i> | 89 |
| <i>Figura 41 – (a) Modelo linear empírico para estimativa da turbidez no Lago Guaíba para 8 de fev. de 2015. e (b) teste de validação do modelo.....</i>  | 90 |
| <i>Figura 42 -(a) Modelo linear empírico para estimativa da transparência no Lago Guaíba para 8 de fev. de 2015. e (b) teste de validação do modelo.....</i>  | 91 |
| <i>Figura 43 - Estimativa de Turbidez, banda 3 do sensor LISS-III, 8 de fevereiro de 2015, Lago Guaíba. ....</i>  | 92 |
| <i>Figura 44 - Estimativa de Transparência do Disco de Secchi (Banda 3 do sensor LISS-III, 8 de fevereiro de 2015).....</i>   | 93 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabela 1 - Características espectrais dos instrumentos imageadores OLI e TIRS. Fonte: Adaptado de USGS, 2015a.</i> .....   | 37 |
| <i>Tabela 2 - Características espectrais dos instrumentos imageadores LISS-III do ResourceSat-2.</i> .....  | 38 |
| <i>Tabela 3 - Características do Lago Guaíba</i> .....  | 42 |
| <i>Tabela 4 - Estatística descritiva da série de imagens utilizadas na análise com dados de precipitação acumulados 16 dias anteriores a aquisição e respectivas média de reflectância para todo o Lago Guaíba.</i> ..... | 52 |
| <i>Tabela 5 - Estatísticas descritivas das variáveis limnológicas coletadas na campanha de campo em fevereiro de 2015 no Lago Guaíba.</i> .....   | 64 |
| <i>Tabela 6 - Dados coletados em campo no Lago Guaíba no dia 9 de fevereiro de 2015.</i> .....  | 72 |
| <i>Tabela 7 - Bandas de absorção e seus respectivos comprimento de onda central.</i> .....  | 85 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CE – Condutividade Elétrica
- Chl-*a* – Clorofila-*a*
- COAs – Constituintes Ópticamente Ativos
- DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto
- DOM – Matéria Orgânica Dissolvida
- DS – Disco de Secchi
- ENOS - El Niño-Oscilação Sul
- EROS – Earth Resources Observation and Science
- EC – Estação de Coleta
- ESPA – Center Science Processing Architecture
- FLAASH – Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
- GLOVIS – Global Visualization Viewer
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- ISRO – Indian Space Research Organization
- LABGEOTEC – Laboratório de Geotecnologias
- Landsat – Land Remote Sensing Satellite
- LISS-III – Linear Imaging Self-Scanning Sensor-3
- LDCM – LANDSAT DATA CONTINUITY MISSION
- NDWI – Normalized Difference Water Index
- NIR – Near infrared
- NTU – Nephelometric Turbidity Units (Unidades Nefelométricas de Turbidez – UNT)
- NRSA – National Remote Sensing Agency
- OLI – Operational Land Imager
- PAR – *Photosynthetic Active Radiation* (Radiação Fotossinteticamente Ativa)
- POAs – Propriedade Ópticas Aparentes
- POIs – Propriedades Ópticas Inerentes
- RMPA – Região Metropolitana de Porto Alegre
- SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
- TDS – Totais de Sólidos Dissolvidos
- TIRS – Thermal Infrared Sensor

TM – Thematic mapper

TSS – Totais de Sólidos em Suspensão

UV – Ultraviolet

VIS – Visible

USGS – Serviço Geológico dos Estados Unidos

## SUMÁRIO

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>  | 17 |
| 1.1      | Objetivos  | 18 |
| 1.2      | Estrutura da dissertação   | 19 |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>   | 20 |
| 2.1      | Características ópticas da água  | 20 |
| 2.2      | Constituintes opticamente ativos   | 22 |
| 2.2.1    | Considerações acerca das propriedades ópticas da água pura                                   | 23 |
| 2.2.2    | Matéria orgânica dissolvida (substâncias húmicas, <i>yellow substance</i> ou <i>gilvin</i> ) | 24 |
| 2.2.3    | Total de Sólidos em Suspensão (TSS)  | 25 |
| 2.2.4    | Clorofila  | 26 |
| 2.3      | Sensoriamento Remoto Hiperespectral e Medidas de Reflectância <i>In Situ</i>                 | 28 |
| 2.4      | Tratamento e Processamento de dados hiperespectrais  | 29 |
| 2.4.1    | Suavização da curva espectral  | 29 |
| 2.4.2    | Análise derivativa   | 30 |
| 2.4.3    | Contínuo espectral   | 33 |
| 2.5      | Sensoriamento remoto orbital   | 35 |
| 2.6      | Visão geral do Sensor OLI/Landsat-8 e Sensor LISS-III/ResourceSat-2                          | 36 |
| <b>3</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b>  | 39 |
| 3.1      | Materiais utilizados na pesquisa   | 39 |
| 3.2      | Sequência metodológica   | 40 |
| 3.3      | Área de Estudo   | 41 |
| 3.3.1    | Amostragem para coleta de dados espectrais e limnológicos                                    | 43 |
| 3.4      | Coleta dos dados espectrais e limnológicos   | 45 |
| 3.5      | Parâmetros Limnológicos  | 47 |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 3.5.1      | Transparência ou claridade da água.....   | 48        |
| 3.5.2      | Temperatura.....  | 48        |
| 3.5.3      | Condutividade elétrica e sólidos dissolvidos.....   | 48        |
| 3.5.4      | pH (potencial hidrogeniônico).....  | 49        |
| <b>3.6</b> | <b>Parâmetros espectrais.....</b>   | <b>49</b> |
| 3.6.1      | Análise Derivativa .....  | 49        |
| 3.6.2      | Remoção do Contínuo .....   | 50        |
| 3.6.3      | Aquisição e processamento das imagens dos sensores OLI/Landast-8 e LISS-III ResourceSat-2.....                                  | 51        |
| <b>3.7</b> | <b>Espacialização das variáveis limnológicas coletadas em campo.....</b>  | <b>54</b> |
| <b>3.8</b> | <b>Testes estatísticos de correlação .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Dados de precipitação e de reflectância da água .....</b>  | <b>56</b> |
| 4.1.1      | Análise espacial e temporal da distribuição da reflectância no Lago Guaíba ....   | 60        |
| <b>4.2</b> | <b>Variáveis Limnológicas .....</b>   | <b>64</b> |
| 4.2.1      | Teste de normalidade.....   | 64        |
| <b>4.3</b> | <b>Análise dos dados hiperespectrais .....</b>  | <b>70</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Correlação com as variáveis limnológicas .....</b>   | <b>74</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Análise Derivativa.....</b>  | <b>76</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Remoção do Contínuo .....</b>  | <b>84</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Regressões empíricas para inferência de variáveis limnológicas por meio da imagem do sensor LISS-III/ResourceSat-2 .....</b> | <b>89</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>  | <b>95</b> |
| <b>6</b>   | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>99</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

O lago Guaíba destaca-se como um importante corpo d'água, localizado na porção costeira do estado do Rio Grande do Sul. No Guaíba deságuam oito sub-bacias que se estendem pelo centro e nordeste do Rio Grande do Sul, abrange uma área de aproximadamente 85.000 km<sup>2</sup> e mais de 250 municípios, dentre os quais se destacam Porto Alegre, Eldorado do Sul, Guaíba, Barra do Ribeiro e Viamão. Além de possuir localização privilegiada, o Guaíba exerce ainda funções sociais primordiais a estes municípios adjacentes, como de estocar água para usos futuros, abastecimento urbano, agrícola e industrial. A Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) é a mais densamente habitada do Estado, com mais de 4 milhões de habitantes, que respondem por quase 70% do PIB do Estado (NICOLODI *et al.*, 2010; IBGE, 2010).

Nas últimas décadas o lançamento de esgotos domésticos de RMPA e de resíduos industriais nos rios Gravataí e Sinos, na região metropolitana, foram responsáveis por degradar a qualidade das águas do Guaíba. Desta maneira, a poluição vem comprometendo não somente a qualidade da água utilizado para abastecer a população, mas também de forma permanente o ecossistema aquático como um todo.

A aplicabilidade do sensoriamento remoto para os ecossistemas aquáticos é bastante contextualizada em livros e artigos científicos. A utilização de dados adquiridos tanto a nível orbital quanto de campo, para o monitoramento dos componentes ópticos da água, tem como base o fato de que estes são determinados pela concentração de sedimentos em suspensão, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida, sendo estes chamados de constituintes opticamente ativos (COAs), pois alteram as propriedades espectrais da água pura (DEKKER, 1993; FELIX, 1993; RUDORFF *et al.*, 2007).

Ao se conduzir uma pesquisa de sensoriamento remoto da água é importante ter o entendimento de que a resposta espectral da água se restringe a uma faixa relativamente estreita de comprimento de onda. Isto é causado pela baixa irradiância solar de comprimentos de onda mais curtos que aproximadamente 400 nm e por uma combinação de baixa energia solar e o nítido aumento da absorção da luz pela água acima de aproximadamente 850 nm. Desta maneira, o intervalo de 400 a 850 nm é o mais recomendado para o sensoriamento remoto da água (DEKKER, 1993; JENSEN, 2011).

Com o avanço dos sensores portáteis hiperespectrais, um dos enfoques dado para se reduzir o efeito dos componentes aditivos na água, que não contém a informação de interesse é a análise derivativa. Experimentos realizados por Goodin *et al.* (1993) demonstram que a primeira derivada permite remover o sinal de reflectância da superfície da água, facilitando a detecção de sedimentos em suspensão, e que a segunda derivada remove o efeito espectral das partículas inorgânicas em suspensão, mantendo nos dados apenas a informação associada à presença da clorofila.

As imagens de satélite são uma importante ferramenta nos estudos ambientais. Os dados da série Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*), atualmente com o sensor OLI – *Operational Land Imager* – do satélite Landsat-8, são disponibilizados de forma gratuita e possuem uma ampla cobertura temporal. Mas a utilização das imagens deste sensor para avaliação das condições de ecossistemas aquáticos ainda é bastante restrita, havendo necessidade de maiores estudos.

Em vista do que foi discutido, este trabalho traz as seguintes proposições a serem respondidas: (a) sendo o Guaíba um lago interior tipicamente turvo e opticamente complexo, em que os sólidos em suspensão e o organismos clorofilados determinam o seu comportamento espectral, é possível identificá-los por dados de sensoriamento remoto e analisar a contribuição de cada um no comportamento espectral da água do Guaíba?; (b) a partir de imagens de satélite é possível compreender a distribuição de tais constituintes no comportamento espectral da água do Guaíba, possuindo ou não como suporte dados limnológicos adquiridos em campo?

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é caracterizar as águas do lago Guaíba - RS, quanto as suas propriedades ópticas, a partir da integração de dados de sensoriamento remoto orbital e de Espectrorradiometria de campo.

### **Este trabalho compreende os seguintes objetivos específicos:**

- Relacionar a reflectância das águas do Lago Guaíba, no contexto espaço-temporal com dados de precipitação pluviométrica.
- Verificar o potencial da aplicação da análise derivativa e remoção do contínuo sobre dados hiperespectrais da água medidos por espectrorradiômetro, visando identificar os COA's que determinam a reflectância da água do Guaíba.

- Avaliar o potencial de utilização das imagens de satélite para estimar e mapear a distribuição espacial dos COA's.

## **1.2 Estrutura da dissertação**

Além deste capítulo introdutório, o qual apresentou a importância do sensoriamento remoto e seus produtos para o estudo de ecossistemas aquático e os objetivos da pesquisa, o presente documento conta ainda com os seguintes capítulos: Capítulo 2, que traz o referencial teórico acerca do sensoriamento remoto da água e suas características ópticas, assim como os principais constituintes que regem essas características, como: a própria molécula de água, matéria orgânica dissolvida, sólidos inorgânicos suspensos e clorofila-*a*. além de informações relativas aos sensores utilizados nesta pesquisa, hiperespectrais e multiespectrais. O Capítulo III traz o os materiais utilizados na aquisição tanto dos dados limnológicos em campo como os espectrais, e os métodos utilizados para avaliar e interpretar esses dados. O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos a partir da integração dos dados de precipitação, limnológicos e espectrais, e as discussões acerca do potencial dos métodos aplicados em discriminar os constituintes opticamente ativos presentes na água, assim como os subsídios que essas informações trarão para o conhecimento da área de estudo e à novos estudos com foco em sensoriamento remoto da água. E finalmente no Capítulo V as considerações e recomendações para a continuidade das questões que ainda ficaram em aberto ao término desta pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Características ópticas da água

A trajetória da radiação eletromagnética antes de atingir a superfície de um lago pode sofrer uma série de interferências a partir de componentes na atmosfera, dentre estes estão os gases oxigênio, ozônio, dióxido de carbono e vapor d'água, além de partículas de poeira. Quando parte desta radiação é absorvida ou refletida por tais componentes temos a radiação solar indireta ou difusa. Por outro lado, a parte do fluxo de radiação que passa pela atmosfera é chamado de radiação solar direta. Desta maneira, a quantidade de radiação que incide sobre a superfície de um lago pode ser de forma direta ou difusa, e irá depender, dentre outros fatores, da quantidade de componentes na atmosfera (WETZEL, 1993; ESTEVES, 1998).

A radiância detectada por um sensor a bordo de um satélite será dependente da energia eletromagnética que chega de quatro fontes de acordo com o esquema na Figura 1. Da radiação total ( $L_t$ ) detectada por um sensor parte desta será, como mencionado anteriormente, a que sofreu absorção ou desvios de trajetória pelos componentes presentes na atmosfera, sendo considerada, segundo Jensen (2009) a radiância de trajetória ( $L_p$ ).

Da radiação solar que chega à superfície da água, parte é refletida ( $L_s$ ) e outra parcela é absorvida e dispersa dentro da coluna d'água em um processo denominado de atenuação de radiação. Ambas as interações constituem as **propriedades ópticas aparentes (POAs)**, e irão depender das propriedades das massas d'água, principalmente do ângulo de incidência da radiação e da concentração de materiais presentes na coluna d'água (WETZEL, 1993; KIRK, 2011; JENSEN, 2011).

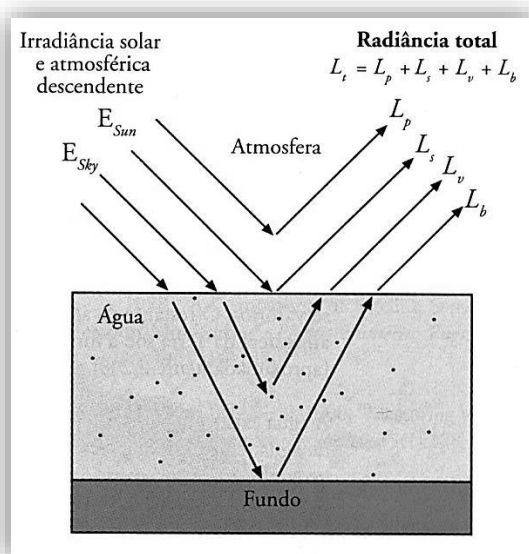


Figura 1 - Radiância total que é registrada por um sensor saindo de um corpo d'água.  $E_{sun}$  é a irradiância do sol e  $E_{sky}$  é da atmosfera. Fonte: JENSEN (2011).

Considerando a radiação incidente que é refletida pela superfície d'água, Kirk (2011) observou que a mesma aumenta de 2% para 100% da radiação incidente verticalmente quando se varia o ângulo zenital da radiação incidente para baixo, já que o feixe se aproxima do plano de incidência. Ou seja, para ângulos de incidência perpendiculares à superfície da água, de  $0^\circ$  e variando até  $45^\circ$ , de 2% a 2,8% da radiação são refletidos, respectivamente. Segundo Wetzel (1993) o ângulo de incidência nas regiões temperadas e polares altera com a sequência das estações do ano.

Para estudos em sensoriamento remoto a radiação solar que é refletida pela camada mais superficial da água (mas que pode penetrar até cerca de 1 mm) é a mais importante, pois contém informações espectrais valiosas sobre as características da superfície do corpo d'água.

Para a radiação solar que penetra na coluna d'água, denominada radiância volumétrica de subsuperfície ( $L_v$ ), Jensen (2011) destaca duas situações: absorção e dispersão (ou seja, desvio do seu caminho original) dos fótons pela molécula d'água e pelas substâncias dissolvidas ou em suspensão presentes na água. As propriedades de absorção e dispersão (ou espalhamento) no meio aquático para a radiação eletromagnética de um dado comprimento de onda são especificadas em termos do coeficiente de absorção, o coeficiente de espalhamento e a função de espalhamento volumétrico (JENSEN, 2011). Estas são definidas como as **propriedades ópticas inerentes (POIs)**, pois suas magnitudes dependem apenas das substâncias que compõe

o meio aquático (constituintes ópticamente ativos) e não da geometria do campo de radiação que o permeia.

Por fim, a radiação que penetra na coluna d'água e chega ao fundo do corpo d'água e é propagada de volta até sair do corpo d'água e alcançar o sensor é denominada de radiação de fundo ( $L_b$ ) (JENSEN, 2011).

O somatório dos coeficientes de absorção e de espalhamento dá origem ao coeficiente de atenuação vertical, sendo que todos têm de unidades de 1/unidade de comprimento, sendo expressos normalmente em  $m^{-1}$ . A quantidade de energia na coluna d'água desta forma é expressa pela Equação 1, onde é possível observar que o fluxo radiante diminui exponencialmente com o aumento da profundidade (KIRK, 2011)

$$\Phi = \Phi_0 e^{-cr} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:  $\Phi$  = radiação que diminui para certa profundidade;  $\Phi_0$  = fluxo de radiação (quanta por unidade de tempo) incidente na forma de um feixe paralelo com a superfície;  $e$  = base do logaritmo neperiano;  $c$  = coeficiente de atenuação;  $r$  = profundidade ( $m^{-1}$ ).

Utilizando a Equação 2, o valor do coeficiente de atenuação vertical,  $c$ , pode ser obtido a partir das medições da diminuição na intensidade de um feixe paralelo passando através de um caminho óptico de forma conhecida,  $r$ .

$$c = -\frac{1}{r} \ln \frac{\Phi_0}{\Phi} \quad (\text{Equação 2})$$

## 2.2 Constituintes opticamente ativos

Os constituintes opticamente ativos (COAs) podem ser entendidos como todos aqueles que alteram as propriedades ópticas inerentes da água, tais como: os sólidos suspensos (incluindo a matéria orgânica dissolvida), os pigmentos fotossintetizantes e a própria molécula d'água (GOODIN *et al.*, 1993; RUDORFF *et al.*, 2007). A concentração de cada um dos COAs no volume d'água é capaz de alterar sua reflectância espectral (ESTEVES, 1998; NOVO, 2010). Quanto menor sua concentração na água mais baixa é sua reflectância, mesmo se tratando da

região do visível do espectro eletromagnético, devido ao baixo coeficiente de espalhamento e alta transmitância da água pura (ROSA, 2009).

Se tratando das águas interiores turvas e opticamente complexas, a combinação dos COAs na coluna d'água irá contribuir para maior parte da absorção e do espalhamento nesses corpos d'água, fator este de grande importância para o sensoriamento remoto (NOVO, 2010).

### 2.2.1 Considerações acerca das propriedades ópticas da água pura

Para compreender o quanto cada um dos COAs e suas concentrações podem influenciar no espectro de reflectância da água é necessário compreender como a água pura responde à radiação. A água pura tem baixa reflectância mesmo na região do visível do espectro, sendo que quanto mais pura (baixo teor de constituintes suspensos ou dissolvidos) mais baixa é sua reflectância (NOVO, 2010). Segundo Dekker (1993) a absorção começa a aumentar nos comprimentos de onda acima de 550 nm, tornando-se bastante significativa na região do vermelho (Figura 2). E a um metro de profundidade a água irá absorver cerca de 35% da radiação solar incidente. Observam-se ainda feições de absorção características em 610-620 e 660-670 nm.

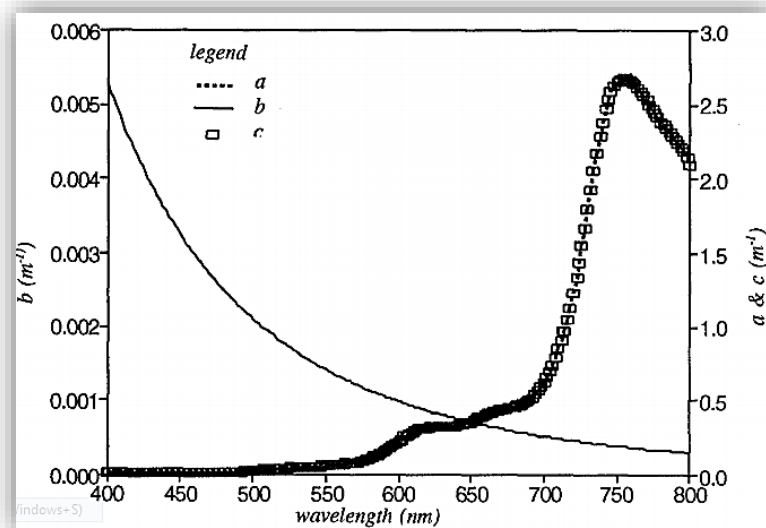


Figura 2 - Coeficiente de absorção (a) de dispersão (b) e atenuação (c) para água pura. Fonte:

Dekker (1993)

Pode ser ainda observado que o espalhamento pela água é inversamente proporcional ao comprimento de onda, ou seja, nas faixas dos menores comprimentos, principalmente na região do azul, é onde o espalhamento é máximo (DEKKER, 1993).

### 2.2.2 Matéria orgânica dissolvida (substâncias húmicas, *yellow substance* ou gilvin)

A *matéria orgânica dissolvida* (DOM) presente em lagos interiores origina-se principalmente da decomposição de matéria orgânica alóctone. Essa matéria orgânica, que está presente no solo ou na água, provém da degradação biológica de resíduos, principalmente de plantas. No decorrer do processo de decomposição pela atividade dos microrganismos tem-se a lenta liberação de nutrientes, principalmente dióxido de carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre, que darão origem às substâncias húmicas. É a partir destas substâncias húmicas que a matéria orgânica dissolvida de coloração amarela na água é derivada (KIRK, 2011; ROSA, 2003).

Quando do solo é extraído com álcali as substâncias húmicas teremos três frações que são quimicamente muito semelhantes. A primeira provém do material húmico que não dissolve, sendo denominado de *humica*. A fração das substâncias húmicas solúveis em meio alcalino diluídos, a qual precipita pela acidificação do extrato alcalino, denomina-se de ácidos húmicos. Já o material húmico que permanece em solução é chamado de ácido fúlvico (ROSA & ROCHA, 2003).

A origem da DOM também ser da produção autóctone. O fitoplâncton presente nas camadas mais superficiais de um lago, onde há disponibilidade de luz, responsável pela produção primária e gera matéria orgânica por meio da fotossíntese. O zooplâncton consome o fitoplâncton e produz matéria orgânica. O bacterioplâncton, por sua vez, decompõe essa matéria orgânica (KIRK, 2011; JENSEN, 2011).

Segundo Dekker (1993) os húmus aquáticos podem absorver a luz azul eficientemente em alguns centímetros do topo da coluna d'água. O elevado coeficiente de absorção se reduz exponencialmente a partir deste comprimento de onda e em direção aos comprimentos de onda mais longos (Figura 3).



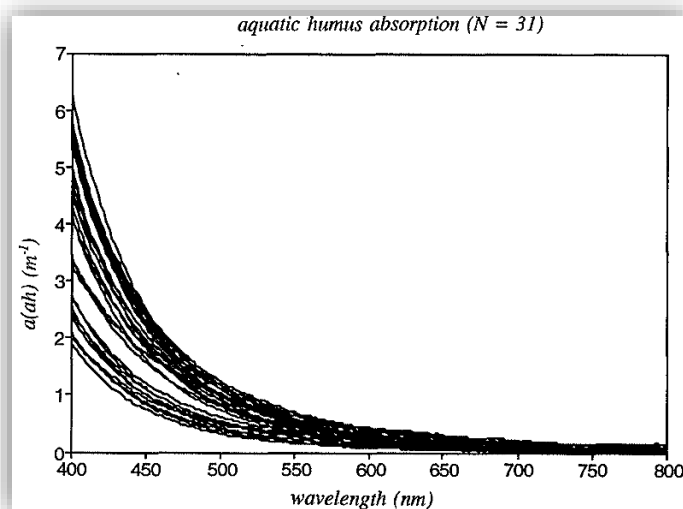


Figura 3 - Coeficiente de absorção das substâncias húmicas em função do comprimento de onda. Fonte: Dekker (1993).

### 2.2.3 Total de Sólidos em Suspensão (TSS)

A concentração de totais de sólidos suspensos (dada em  $mg.L^{-1}$ ) é o parâmetro de qualidade de água que tem sido mais extensivamente estudado, pois é o que afeta com maior intensidade o comportamento óptico da água. O aumento na quantidade de partículas em suspensão pode, em certos comprimentos de onda em que não há absorção significativa, aumentar o retroespalhamento da água mais do que o coeficiente de absorção (KIRK, 2012).

O TSS é composto basicamente por matéria orgânica e inorgânica em suspensão. A matéria orgânica em suspensão pode ser viva, como o fitoplâncton, ou morta com detritos. Já a matéria inorgânica é constituída por minerais ricos em silício, alumínio e óxidos de ferro. A soma dos componentes matéria orgânica morta e matéria inorgânica dos sólidos em suspensão é referenciada como tripton ou fração não algal (ESTEVES, 1998; BARBOSA, 2005; JENSEN, 2011).

Segundo Hermes & Silva (2004) sólidos totais em suspensão correspondem a fração dos sólidos presentes na água, que ficam retidos em uma peneira ou filtro de 2,0 mm. As altas concentrações de sólidos em suspensão podem trazer consigo substâncias tóxicas, como agrotóxicos, fertilizantes e metais. Além disso, quando associado às atividades humanas proporciona o assoreamento de rios e lagos, devido ao alto conteúdo de material em suspensão, desequilibrando o ecossistema aquático.

Vários pesquisadores verificaram correlação entre a reflectância medida acima da superfície da água e o aumento da concentração de sólidos suspensos (Novo *et al.*, 1991; Lodhi *et al.*, 1997; Doxaran *et al.*, 2002). Essa correlação foi estatisticamente significativa e constante de 450 (ou 500) a 900 nm, associadas à taxa de mudança na reflectância espectral com o pico de concentração de TSS na região do vermelho do espectro. Estas considerações podem ser melhor observadas na Figura 4, onde se observa que o incremento de concentração de sólidos na água tem impacto geral na reflectância nas porções do visível e infravermelho próximo.

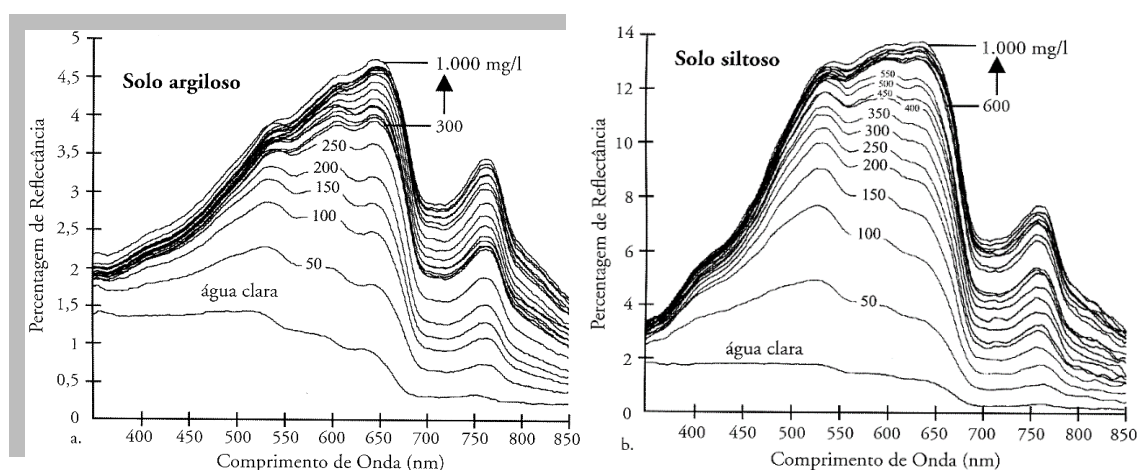


Figura 4 - Reflectância espectral da água com vários níveis de concentração de sedimentos em suspensão do tipo argiloso, em (a), e siltoso em (b). Fonte: Adaptado de Jensen (2011).

#### 2.2.4 Clorofila

As bactérias clorofiladas, algas e macrófitas aquáticas presentes em um ambiente aquático possuem compostos muito eficazes na absorção da radiação, como clorofilas, carotenóides e xantofilas. O fitoplâncton, grupo heterogêneo composto por algas fotossintetizantes, possui grande contribuição para atenuação da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) com a profundidade (ESTEVEZ, 1998; KIRK, 2011).

Em relação às concentrações de pigmentos de algas, Wetzel (2000) explica que podem variar, dependendo do metabolismo, luz, temperatura, disponibilidade de nutrientes, e outros fatores. Pigmentos vegetais das algas e cianobactérias consistem das clorofilas e carotenóides (carotenos e xantofilas). As três principais clorofilas, *a*, *b* e *c*, absorvem luz nos comprimentos de onda específicos quando dissolvidas em solventes orgânicos. A partir dessas características

de absorção, a estimativa da concentração dos pigmentos pode ser feita. A clorofila *a* é a mais dominante dos pigmentos e ocorre em maior abundância. Assim, a Clorofila *a* por si só é usada para estimar a biomassa de algas.

A clorofila *a* ao ser introduzida na água pura provoca mudanças em suas características de reflectância espectral, isto é, em sua cor. A Figura 4 exibe as características da reflectância espectral da água clara e da mesma água contendo algas que possuem em sua composição celular o pigmento clorofila *a*. A água clara refletiu aproximadamente 2% entre 400 e 500 nm e esta reflectância diminuiu gradualmente para menos que 1% em comprimentos de onda maiores que 710 nm. Observa-se que na curva espectral relativa à água contendo algas (e clorofila), há um significativo decréscimo na quantidade relativa de energia refletida ocasionado pela absorção da radiação pela chl-*a* nos comprimentos de onda do azul (entre 400 e 500 nm) e do vermelho (aproximadamente em 675 nm), mas ocorre um aumento na reflectância ocasionado pelo retroespalhamento da chl-*a* no comprimento de onda do verde (JENSEN, 2011).

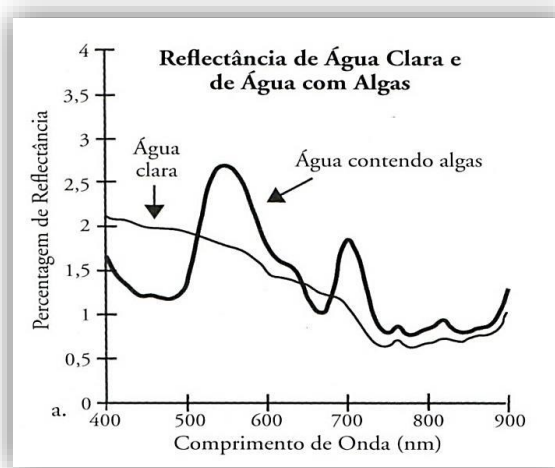


Figura 5 - Porcentagem de reflectância de água clara e de água com algas com base em medidas in situ feitas com espectrorradiômetro. Fonte: HAN (1997) e JENSEN (2009).

Rundquist *et. al* (1996), por meio de dois experimentos controlados (Figura 6), apresentou algumas considerações acerca do comportamento espectral da água com diferentes concentrações de clorofila: baixa refletividade entre 400 e 500 nm (“A”) nas figuras a e b, devido a absorção da luz azul; máxima reflectância da luz verde entre 560 e 570nm (“B”); uma inflexão menor em torno de 640 nm (“C”), presumivelmente devido ao retroespalhamento proporcionado pelas substâncias orgânicas dissolvidas na água ou pigmentos acessórios (Gitelson, 1992); típica absorção da luz vermelha próximo a 676nm (“D”); refletividade no NIR

proeminente em torno de 697 – 700 nm (“E”), e uma pequena feição de reflectância em torno 810 nm (“F”), provavelmente causado por retroespalhamento de matéria orgânica (por exemplo, células de algas), combinado com a absorção geral do NIR em águas claras.

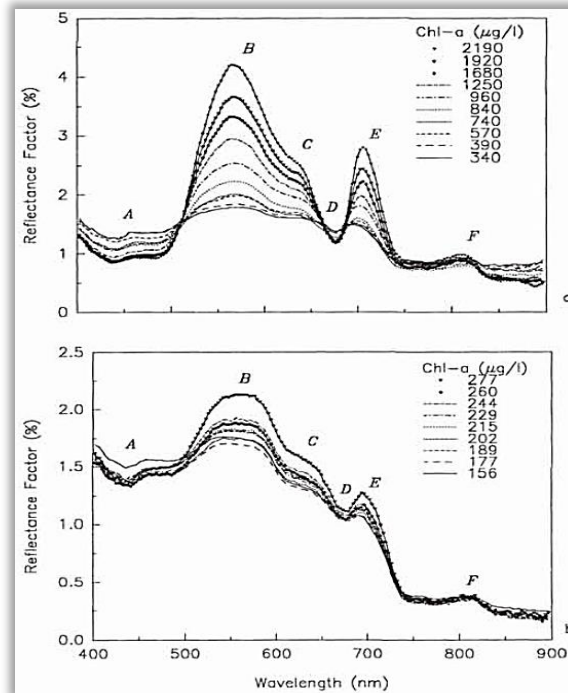


Figura 6 - Reflectância da superfície da água com variações na concentração de clorofila, experimento “a” e “b”. Fonte: Rundquist *et al.* (1996).

### 2.3 Sensoriamento Remoto Hiperespectral e Medidas de Reflectância *In Situ*

Com o aperfeiçoamento das técnicas de aquisição e interpretação de imagens de sensoriamento remoto tem-se exigido um melhor entendimento das características espectrais dos objetos da superfície terrestre. Desta maneira, é importante a obtenção de medidas de reflectância espectral *in situ*, em que os objetos estão sob as condições de campo e a iluminação e condições das amostras estão em condições naturais (STEFFEN, 1996).

O fator de reflectância bidirecional é uma das grandezas radiométricas mais utilizadas para caracterizar espectralmente os objetos na superfície terrestre. As medidas de reflectância *in situ* são realizadas com o auxílio de sensores hiperespectrais, como os espectrorradiômetros. Estes equipamentos possibilitam obter uma melhor compreensão do comportamento espectral dos alvos, ou seja, de como eles refletem a energia incidente, em função das suas características

bio-físico-químicas ao longo de determinados intervalos do espectro eletromagnético (STEFFEN, 1996; NOVO, 2011).

Os espectrorradiômetros são conhecidos como sensores não imageadores que permitem adquirir a energia refletida em cada comprimento de onda ao longo de um espectro contínuo, privilegiando a informação espectral (NOVO, 2010).

Segundo Jensen (2011) no processo de medição da reflectância espectral com o espectrorradiômetro é necessário obter duas medidas espectrais, referentes a magnitude de radiância refletida ( $L_r$ ) – de uma amostra de referência (p.ex., *Spectralon*); – e outra da amostra de interesse ( $L_T$ ), atribuído ainda um fator de correção ( $k$ ). Desta maneira, o espectro de reflectância ( $\rho_T$ ) é obtido segundo a Equação 3.

$$\rho_T = \frac{L_T}{L_R} \times k \quad \text{Equação (3)}$$

*Spectralon* é o material de referência mais largamente utilizado para obter medidas de reflectância espectral *in situ*, e apresenta comportamento altamente lambertiano. Trata-se de uma resina termoplástica branca (ou cinza) que demonstrou ter maior reflectância difusa que qualquer outro material. O seu uso deve ser limitado às regiões do UV-VIS-NIR (250 a 2500 nm), pois para estas faixas a radiação apresenta valores de reflectância de >99% (LABSPHERE, 2006; JENSEN, 2011).

## 2.4 Tratamento e Processamento de dados hiperespectrais

### 2.4.1 Suavização da curva espectral

A suavização de curvas espectrais faz parte do objetivo de se melhorar a análise espectral principalmente quando aplicada principalmente para análise derivativa e de dados de alta resolução espectral que contenham ruídos (TSAI & PHILPOT, 1998).

Muitos fatores são responsáveis pelos ruídos presentes nos espectros de reflectância coletados com o radiômetro em campo. Por exemplo, o vapor d'água na atmosfera, que interfere

no fluxo radiante que incide sobre o alvo, pois absorve a radiação em determinadas faixas do espectro eletromagnético. Além disso, o ângulo de elevação solar e o espalhamento e na atmosfera (que resulta na radiação difusa) podem influenciar no comportamento e na magnitude do fluxo radiante que ilumina o alvo e, por sua vez, no espectro de reflectância obtido (JENSEN, 2011).

Dentre os métodos utilizados para suavização de espectros de reflectância, podem-se destacar o proposto por Savitzky e Golay (1964 apud TSAI & PHILPOT, 1998) que usou ajuste de mínimos quadrados simplificado para suavização e computar derivada. Esse assume que o ruído aleatório tem característica similar em todo o espectro e que pode ser tratado como um processo constante.

Outra técnica muito empregada é o filtro de média simples calcula o valor espectral médio de todos os pontos dentro de uma janela com tamanho especificado trazendo, desta maneira, um novo valor do ponto médio da janela (Equação 4) (TSAI & PHILPOT, 1998):

$$\hat{s}(\lambda_j) = \frac{\sum s(\lambda_i)}{n} \quad \text{Equação (4)}$$

Em que,  $\hat{s}(\lambda_j)$  é o espectro gerado livre de ruído;  $\sum s(\lambda_i)$  é o valor espectral de todos os pontos dentro da janela especificada;  $\lambda$  denota o comprimento de onda;  $n$  (número de pontos de amostragem) é o tamanho do filtro e  $j$  é o índice do ponto médio do filtro.

#### 2.4.2 Análise derivativa

A análise derivativa tem sido amplamente aplicada em estudos que utilizam principalmente dados de sensoriamento remoto hiperespectrais para detectar e realçar os constituintes opticamente ativos nos espectros de reflectância (TSAI & PHILPOT, 1998). Ela representa a taxa de variação instantânea da reflectância espectral (normalmente, podendo ser também da radiância espectral) de um alvo em relação ao comprimento de onda do fluxo de radiação incidente (BARBOSA, 2005).

O método mais simples para o cálculo de derivadas em dados hiperespectrais é por meio da aproximação por diferença finita (ou simétrica). Assim, a equação utiliza uma distância de espaçamento especificado para tomar as diferenças de acordo com a separação entre as bandas (resolução) e o tamanho do filtro ou da largura da banda (TSAI & PHILPOT, 1998; ENNES, 2008). A aproximação usada para a primeira derivada é descrita pela Equação 5.

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_i \approx \frac{s(\lambda_i) - s(\lambda_j)}{\Delta\lambda} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde,  $\Delta\lambda$  é a separação entre bandas adjacentes  $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$  e  $\lambda_j > \lambda_i$  e o intervalo entre banda é assumido como constante.  $s(\lambda_n)$  é o valor de reflectância na faixa de comprimento de onda  $\lambda_n$ . A segunda derivada pode ser derivada a partir primeira derivada, ou seja, aplicando-se a Equação 5 nos dados de primeira derivada em um procedimento computacional simples ou como é descrito em Tsai & Philpot (1998).

A primeira e segunda derivade podem oscilar com maior amplitude do que os espectros primários. Por exemplo, um espectro muda repentinamente de uma inclinação positiva para uma inclinação negativa, tal como no pico de uma stica estreita (ver Figura 7). Os derivados mais distinguíveis são especialmente úteis para separar os picos das bandas que se sobrepõem.

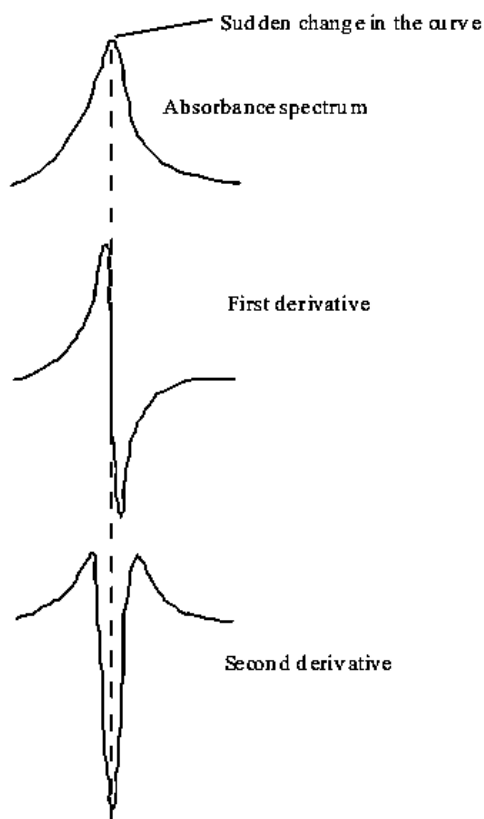


Figura 7 - Picos de derivada.

Em alguns casos a derivada do espectro pode ser um bom filtro de ruído uma vez que mudanças na linha de base têm efeito negligenciável nas derivativas. Por exemplo, o espalhamento aumenta com o comprimento de onda para algumas macromoléculas biologicamente ativas causando um aumento da inclinação da linha de base da absorbância (MORREY, 1968).

Como já foi mencionado, a reflectância espectral de corpos d'água naturais, como lagos, é resultado de um sinal composto e que representa a soma ponderada de vários componentes, como: os sólidos suspensos (incluindo a matéria orgânica dissolvida), os pigmentos fotossintetizantes, e a própria molécula de água (GOODIN *et al.*, 1993; RUDORFF *et al.*, 2007). Desta maneira, segundo Goodin *et al.* (1993) a reflectância de uma determinada superfície de água, de um determinado lago turvo ou reservatório, pode ser entendida como:

$$R = W_w r_w + W_t r_t + W_c r_c \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:  $R$  = é a reflectância a partir de todas as fontes;  $r_w$ ,  $r_t$  e  $r_c$  = reflectância da água, turbidez e componentes clorofilados; e  $W_w$ ,  $W_t$  e  $W_c$  = "peso" de cada componente (água, sedimentos suspensos, etc.).

Os COAs são capazes de alterar as características espectrais da água pelas suas propriedades de absorção e espalhamento e assim determinar as feições presentes em curvas espectrais de reflectância. Goodin (1993) explica que cada componente do sinal composto pode ser representado por um polinômio na N-ésima ordem. Se N variar para cada componente individualmente, então, a diferenciação sucessiva da curva composta original (de ordem 0) deve remover sistematicamente os efeitos de menor ordem.

A técnica de análise de derivada de segunda ou de ordem superior quando empregada em dados de sensoriamento remoto ainda apresenta vantagens pois gera curvas relativamente insensíveis às variações de intensidade de iluminação que são causados por alterações no ângulo de cobertura do sol, cobertura de nuvens, ou topografia (TSAI & PHILPOT, 1998). Assim, as curvas espectrais derivadas são sensíveis à forma e não à magnitude dos espectros.

Rudorff *et al.* (2007) ressaltam que "devido à sua natureza, por ser graficamente representada pela inclinação das tangentes em cada ponto da curva, a derivada evidencia os pontos onde há mudanças bruscas de resposta espectral". O espectro de derivada é assim



resultado da aplicação de uma derivada para transformar os dados do espectro inicial, o que facilita a sua interpretação.

### 2.4.3 Contínuo espectral

Além das variações associadas com o albedo e a inclinação na curva espectral outro fator responsável pelas oscilações espectrais em determinado material são as bandas de absorção. Um dos procedimentos mais comuns para a análise e extração de informações associadas às feições de absorção é a técnica do contínuo espectral, uma função matemática (segmento de linha-reta, polinomial, uma gaussiana, etc.) utilizada para isolar uma feição particular de absorção (CLARK & ROUSH, 1984; GALVÃO, 2001).

A absorção da radiação eletromagnética observada em espectros de reflectância pode ser atribuída a diversos materiais presentes na superfície da terra assim como aos componentes existentes na atmosfera. E a quantidade da radiação que é absorvida em função de um determinado comprimento de onda ou mesmo em uma faixa de comprimento de onda (feição de absorção) pode caracterizar o tipo de material e/ou sua composição.

A técnica de remoção do contínuo foi proposta por Clark e Roush (1984) e consiste em remover as feições contínuas dos espectros. Por exemplo, em Kruse *et al.* (1993), o contínuo foi aplicado nos espectros de calcita (Figura 8) e posteriormente removido (Figura 9), a partir do espectro de reflectância por divisão (reflectância/contínuo), normalizando assim o espectro de reflectância.

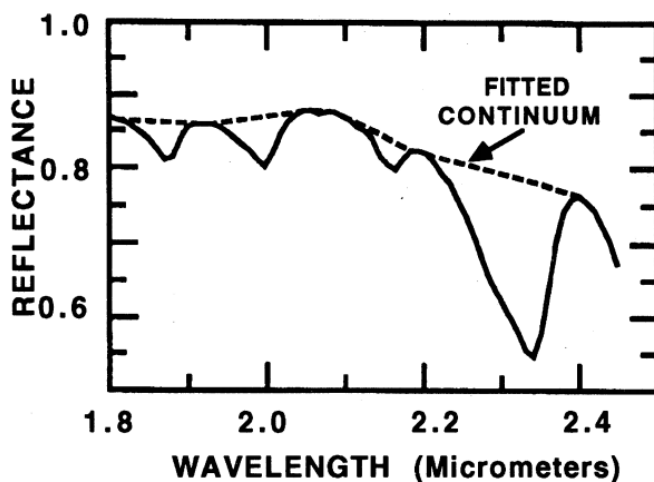


Figura 8 - Espectro de laboratório de calcita mostrando o contínuo ajustado (Fitted Continuum). Fonte: Kruse *et al.*, 1993.

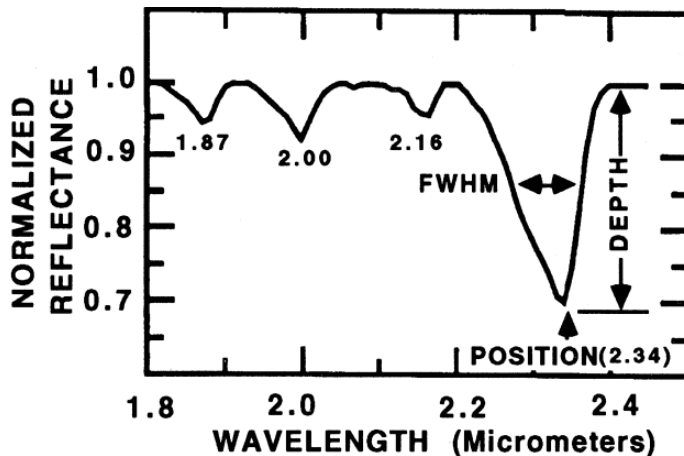


Figura 9 - Espectro de calcita com o contínuo removido mostrando os parâmetros da banda de absorção: 1) posição da banda (position); 2) profundidade de banda (depth); e 3) largura à meia altura (FWHM). Fonte: Kruse *et al.*, 1993.

Conforme a Figura 8, o espectro de reflectância foi ajustado com a curva do contínuo delimitando, assim as quatro bandas de absorção ali presentes. O contínuo é removido dividindo-o pelo espectro de reflectância, segundo a formulação matemática observada na Equação 7 (CLARK & ROUSH, 1984; GALVÃO, 2001; BREUNIG *et al*, 2007).

$$\rho_{(CR\lambda)} = \frac{\rho_{Original(\lambda)}}{\rho_{Contínuo(\lambda)}} \quad \text{Equação (7)}$$

Em que:

$\rho_{(CR\lambda)}$  = é o fator de reflectância direcional cônico com o contínuo removido;

$\rho_{Original(\lambda)}$  = Espectro de reflectância;

$\rho_{Contínuo}(\lambda)$  = Curva do contínuo;

$\lambda$  = Comprimento de onda;

Após a divisão do espectro de reflectância original ( $\rho_{Original}$ ) pela linha do contínuo ( $\rho_{Contínuo}$ ) para uma determinada faixa de comprimento de onda ( $\lambda$ ) se obtém o espectro normalizado com valores que se configuram entre 0 e 1. O objetivo é a posterior obtenção de parâmetros descritores de cada banda de absorção, como a profundidade, largura e área das feições (NOVO, 2001)

A definição do contínuo fornece uma definição mais consistente de profundidade de banda, estando ela associada a quantidade de radiação absorvida (CLARK & ROUSH, 1984;

BREUNIG *et al.*, 2007). A profundidade ( $D_b$ ) de uma feição de absorção pode ser expressa pela equação:

$$D_b = 1 - \rho_{CR\lambda} \quad \text{Equação (8)}$$

Outros parâmetros que também podem ser associados às feições de absorção são posição, largura e assimetria, sendo estes indicadores quantitativos das propriedades espectrais das amostras analisadas. Esta técnica pode servir também para desenvolver modelos que relacionem diretamente os parâmetros da banda de absorção com variáveis limnológicas das amostras (NOBREGA, 2002; ENNES, 2008).

## 2.5 Sensoriamento remoto orbital

Inúmeros estudos buscam relacionar as propriedades ópticas da superfície da água, a partir de imagens orbitais, com os constituintes presentes no sistema aquático (BRANDO & DEKKER, 2003; RUDORFF *et al.*, 2007; MONTANHER, 2013). Em sensoriamento remoto os sistemas sensores imageadores permitem que seja gerada uma imagem bidimensional e tridimensional, em alguns casos, da cena observada (NOVO, 2011).

Um dos satélites mais utilizados para observação de ecossistemas aquáticos pertence a série Landsat, com os scanner *Thematic Mapper* (TM), e atualmente, o *Operational Land Imager* (OLI). Ambos possuem bandas largas na faixa do visível e infravermelho próximo e médio e resolução espacial de 30 m. Como a maior parte dos programas operacionais de sensoriamento remoto, a série Landsat utiliza-se de sensores multiespectrais baseados no princípio da varredura eletro-óptica (KIRK, 2011; NOVO, 2011).

O uso de sensores orbitais, como OLI, no estudo do sensoriamento remoto da água, está mais comumente relacionado à correlação do aumento na radiância em determinadas bandas de comprimentos de onda com o aumento na concentração de determinados tipos de partículas em suspensão, o aumento da radiância sendo devido ao aumento no retroespalhamento (KIRK, 2011).

Bernardo (2015) analisou o potencial do sensor OLI em estimar a concentração de sólidos totais em suspensão no reservatório Barra Bonita. Os resultados permitiram identificar que os modelos empíricos são uma alternativa viável para estimar as concentrações de sólidos.

Brando e Dekker (2003) mostraram que as imagens Hyperion, depois de processadas e reduzidos os ruídos, podem ser usadas para mapear a qualidade óptica da água, a concentração de matéria orgânica dissolvida colorida, clorofila, e total de material em suspensão (como tripton), simultaneamente nas águas complexas de estuários e sistemas costeiros.

Já em corpos d'água interiores outros tipos de modelos empíricos foram desenvolvidos, como em estudos realizados por Novo *et al.* (1993) em que se observou grande variação nas correlações entre a reflectância da água estimada de imagens do sensor TM e a concentração de certos componentes da água.

Apesar da grande gama de trabalhos sobre aplicação de sensoriamento remoto na água, ainda se observam algumas limitações, que são atribuídas principalmente às resolução dos sensores (como espacial e radiométrica). Essa tecnologia tem tido poucos avanços quanto a sensibilidade radiométrica tornando difícil a detecção de diferentes composições de água. Além disso a agentes externos que afetam os sensores ópticos, como cobertura de nuvem, havendo a necessidade de dados mais frequentes já que o corpo d'água está em constante mudança (NOVO, 2001).

Os satélites criados para o estudo dos recursos terrestres fazem parte do grupo de satélites de sensoriamento remoto orbital e monitoramento do meio ambiente (ROSA, 2009). O presente trabalho utilizou-se de dois dos mais utilizados no Brasil e no mundo: LANDSAT e RESOURCESAT.

## **2.6 Visão geral do Sensor OLI/Landsat-8 e Sensor LISS-III/ResourceSat-2**

A missão do programa Landsat, segundo USGS (2015), é proporcionar a aquisição repetitiva de dados multiespectrais de moderada resolução da superfície da Terra em uma base global, sendo estes utilizados para diversos fins: ciência, educação, governo e segurança nacional, etc. Landsat representa a única fonte de dados já calibrados e disponíveis gratuitamente para o público, por meio do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) *Earth Resources Observation and Science* (EROS).

O *Operational Land Imager* (OLI), construído pela *Ball Aerospace & Technologies Corporation* produz imagens na porção do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas do espectro. As imagens registradas têm resolução espacial de 30 metros, para as

bandas do visível e infravermelho, 15 metros, a pancromática, e 100 metros as termais, produzidas pelo sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). Cobre uma vasta área da superfície ao longo de uma faixa de 185 km e devido à órbita quase polar do LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) uma mesma área é imageada a cada 16 dias (Tabela 1).

Tabela 1 - Características espectrais dos instrumentos imageadores OLI e TIRS. Fonte: Adaptado de USGS, 2015a.

|                                      | <b>Bandas</b>                           | <b>Comprimento de Onda (micrometers)</b> | <b>Resolução Espacial (m)</b> |
|--------------------------------------|---|--|-------------------------------|
| <b>Operational Land Imager (OLI)</b> | Band 1 – Aerossol Costeiro              | <b>0.43 – 0.45</b>                       | 30                            |
|                                      | Band 2 - Azul                           | <b>0.45 – 0.51</b>                       |                               |
|                                      | Band 3 - Verde                          | <b>0.53 – 0.59</b>                       |                               |
|                                      | Band 4 – Vermelho                       | <b>0.64 – 0.67</b>                       |                               |
|                                      | Band 5 – Infravermelho Próximo          | <b>0.85 – 0.88</b>                       |                               |
|                                      | Band 6 – SWIR 1                         | <b>1.57 – 1.65</b>                       |                               |
|                                      | Band 7 – SWIR 2                         | <b>2.11 – 2.29</b>                       | 15                            |
|                                      | Band 8 – Pancromático                   | <b>0.50 – 0.68</b>                       |                               |
|                                      | Band 9 – Cirrus                         | <b>1.36 – 1.38</b>                       |                               |
| <b>TIRS</b>                          | Band 10 – Infravermelho Termal (TIRS) 1 | <b>10.60 – 11.19</b>                     | 100                           |
|                                      | Band 11 – Infravermelho Termal (TIRS) 2 | <b>11.50 – 12.51</b>                     |                               |
|                                      | Largura de faixa imageada: 185 km       |  | Tempo de revisita: 16 dias    |

O ResourceSat-2 é uma missão de continuidade dos dados do ISRO (*Indian Space Research Organization*) com melhoria das bandas espectrais do IRS-P6/ResourceSat-1. Cada satélite ResourceSat transporta três câmeras electro-ópticas: LISS-3, LISS-4, AViFS. Todos os três imageadores são *scanners pushbroom* multiespectrais (matriz de detectores CCD). Os dados adquiridos pela missão são utilizados nas mais diversas áreas como: uso da terra, recursos hídricos, áreas com discriminação de culturas agrícolas e monitoramento, estimativa de rendimento, classificação do solo, mapeamento de florestas e zonas costeiras, monitoramento de desastres, etc. (NRSA, 2003).

O LISS-III (*Linear Imaging Self-Scanning Sensor-3*) é um sensor multiespectral com uso na gestão de recursos terrestres e aquáticos. O Tabela 2 resume algumas das características desse sensor:

Tabela 2 - Características espectrais dos instrumentos imageadores LISS-III do ResourceSat-2.

|                               | <b>Bandas</b>                     | <b>Comprimento de Onda (micrometros)</b> | <b>Resolução Espacial</b> |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|---------------------------|
| <b>LISS-III<br/>VNIR/SWIR</b> | Band 2 – Verde                    | <b>0.52 – 0.59</b>                       | 24 m                      |
|                               | Band 3 – Vermelho                 | <b>0.62 – 0.68</b>                       |                           |
|                               | Band 3 – Infravermelho Próximo    | <b>0.77 – 0.86</b>                       |                           |
|                               | Band 4 – SWIR                     | <b>1.55 – 1.70</b>                       |                           |
|                               | Largura de faixa imageada: 142 km | Tempo de revisita: 24 dias.              |                           |

---

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada uma breve descrição da área de estudo, dos materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa e do método adotado no levantamento e análise dos dados limnológicos. Posteriormente, são detalhados os processamentos aplicados nos dados hiperespectrais e orbitais e as ferramentas de análise usadas para atingir os objetivos propostos para avaliar a contribuição dos dados hiperespectrais e orbitais na identificação de alguns componentes opticamente ativos em um corpo d'água.

#### 3.1 Materiais utilizados na pesquisa

- Dados de precipitação da estação meteorológica do INMET de Porto Alegre (n° da estação: 83967);
- Dados hiperespectrais obtidos com o espectrorradiômetro *FieldSpec® HandHeld*;
- Dados limnológicos coletados *in situ*: totais de sólidos em suspensão (TSS) em  $\text{mg. L}^{-1}$ , clorofila-*a* em  $\mu\text{g. L}^{-1}$  e turbidez em NTU. E parâmetros como temperatura (da água e do ar), pH, condutividade elétrica, totais de sólidos dissolvidos e profundidade do Disco de Secchi (cm), para auxiliar na inferência dos parâmetros opticamente ativos e condições locais de tempo.
- Imagens multiespectrais do sensor LISS-III e OLI dos satélites ResourceSat-2 e Landsat-8, respectivamente;

### 3.2 Sequência metodológica

A pesquisa se estruturou conforme apresentado no fluxograma da Figura 10. Inicialmente houve a necessidade de um levantamento bibliográfico referente aos principais temas abordados em sensoriamento remoto da água e as principais técnicas utilizadas para análise e caracterização dos principais constituintes ópticos que afetam as características da água clara.

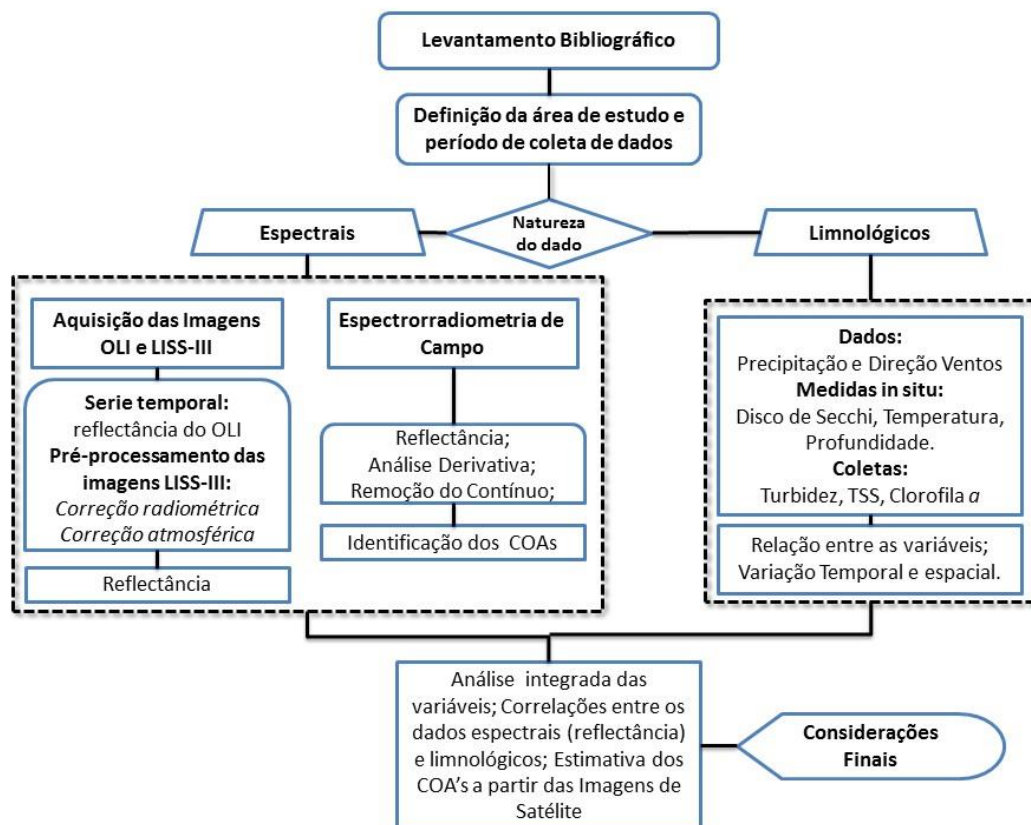


Figura 10 - Fluxograma metodológico

A área de estudo escolhida para a pesquisa foi o Lago Guaíba, toda sua extensão com exceção do delta do Jacuí, por ser um setor de transição de rio para sistema lagunar. O Guaíba é um corpo d'água de grande importância para a região metropolitana de Porto Alegre e foram poucos os trabalhos que buscaram estudar toda a sua abrangência e complexidade utilizando o sensoriamento remoto.



### 3.3 Área de Estudo

O Lago Guaíba localiza-se no estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas 29°55' e 30°24' de latitude Sul e entre 51°01' e 51°20' de longitude Oeste (Figura 11). A Região Hidrográfica do Guaíba, compreendida por 9 bacias, apresenta uma área de aproximadamente 85 mil/km<sup>2</sup>. Os municípios banhados pelo Guaíba são: Barra do Ribeiro, Canoas, Cerro Grande do Sul, Eldorado do Sul, Guaíba, Mariana Pimentel, Nova Santa Rita, Sentinela do Sul, Sertão Santana, Tapes, Triunfo, Viamão e a capital do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O Guaíba recebe a contribuição de oito bacias, sendo que as mais importantes são do Rio Jacuí, Caí, Sinos e Gravataí. O curso inferior dos canais destes rios converge para o Delta do Jacuí e daí seguem pelo leito do Guaíba até a Ponta do Itapuã. Ao Sul este canal desaparece no leito da Lagoa dos Patos por soterramento e suas águas seguem na sequência para o Oceano Atlântico (TOLDO Jr. e ALMEIDA, 2009; ANDRADE NETO *et al.*, 2012;).

O tipo de clima na região do Lago Guaíba, segundo a classificação proposta por Rossato (2011), se enquadra em Subtropical II e III<sup>1</sup>, sendo assim, de úmido para medianamente úmido com variações longitudinais das temperaturas médias. A área de estudo apresenta maior influência dos sistemas polares e tropicais continentais, porém com interferência crescente dos sistemas tropicais marítimos. Influenciam também o relevo (depressão central), a continentalidade e a maritimidade, além das áreas urbanizadas. Os sistemas frontais são responsáveis pela maior parte das precipitações. As chuvas podem oscilar entre 1500 a 1800 mm anuais e a temperatura média anual varia entre 17 a 20°C.

Estendendo-se desde o delta do Jacuí até a ponta de Itapuã do Sul (direção N-S), o Guaíba tem aproximadamente 50 km de comprimento, 470 km<sup>2</sup> de superfície e profundidade média de 2 m. Sua largura é variável, sendo a mínima de 900 m e máxima de 19 km, com formações graníticas na parte leste e pontas arenosas na margem oeste. O regime de escoamento das águas do guaíba é bidimensional, podendo ser longitudinais e transversais ao seu canal (LIVI, 1998; NICOLODI, 2010).

---

<sup>1</sup> Subtropical II – Medianamente úmido com variação longitudinal das temperaturas médias; e Subtropical III – úmido com variação longitudinal das temperaturas médias;

Segundo Nicolodi (2010), o regime fluvial dos tributários (rios Jacuí, Sinos, Taquari e Gravataí) perdem seu potencial como transportadores de sedimentos ao ingressar na bacia deposicional do Guaíba (em direção à Usina do Gasômetro). Assim, em que os sedimentos mais grosseiros são retidos no delta e os mais finos ingressam no lago como plumas de material em suspensão.

O Lago Guaíba, apesar de possuir um regime hidrodinâmico complexo, tanto em épocas de cheia como em épocas de estiagem, possui comportamento similar à de um reservatório, onde a seção de Itapuã funciona como um controle, dirigido por condições de níveis de montante e jusante (NICOLODI, 2010). O tempo de residência das águas, entre a Usina do Gasômetro e a Ponta de Itapuã, é em média de 10 dias (TOLDO *et al.*, 2000).

Sendo assim, apesar do Guaíba possuir um fluxo preferencial, direcionado ao Sul, este pode ser influenciado fortemente pela ação eólica que causa represamento e inversão dos fluxos, no caso de ventos do quadrante Sul (NICOLODI, 2007; 2010). Ventos com baixa intensidade, independente da direção, exercem pouca influência na distribuição espacial e no módulo da velocidade do escoamento como verificado por Paz *et al.* (2005). Segundo o INMET (2014) a direção predominante dos ventos anual para a região é de SE.

Tabela 3 - Características do Lago Guaíba

|                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Área                        | 470 km <sup>2</sup>           |
| Profundidade média          | 2,8 m                         |
| Profundidade máxima (canal) | 5,18 m                        |
| Largura (máximo)            | 19,2 km                       |
| Comprimento                 | 50,5 km                       |
| Volume d'água               | 1,5 bilhões de m <sup>3</sup> |
| Vazão                       | 2,2 milhões de l/s            |

Fonte: (LIVI, 1998; NICOLODI, 2007; 2010).

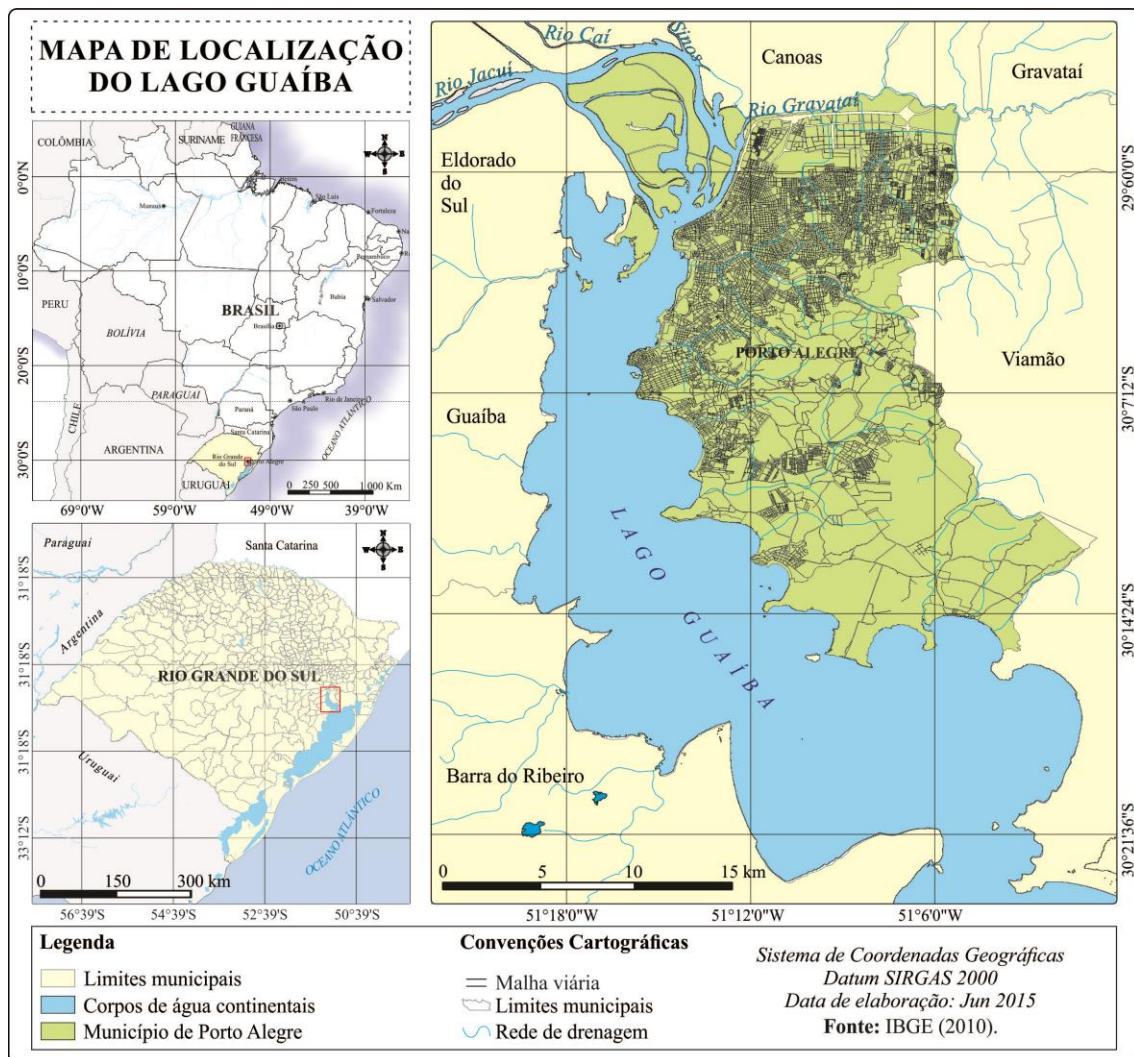


Figura 11 - Localização do Lago Guaíba no Estado do Rio Grande do Sul e Brasil.

### 3.3.1 Amostragem para coleta de dados espectrais e limnológicos

Uma questão muito importante a ser considerada quando se trabalha com dados limnológicos, é a sua representatividade espacial. A representatividade espacial dos dados ser bastante variável, ficando difícil a comparação dos dados entre si. Além disso, a espacialização ou representatividade dos dados pode variar com o tamanho do sistema aquático. Quanto maior o corpo d'água maior a variabilidade dos fatores biológicos, abióticos e antrópicos a que encontra sujeito (NOVO & TUNDISI, 1988).

No caso do Lago Guaíba a necessidade de dados frequentes (mensalmente, por exemplo) por longos períodos de tempo inviabilizam ou tornam muito difícil o aumento do número de estações de coleta. O DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgotos), recentemente vem

trabalhando com um reduzido número de estações de coleta mensais, e a amostragem vem sendo feita no decorrer de vários dias do mês, o que torna normalmente difícil sua análise integrada. Frente a estas limitações, o sensoriamento remoto tem se mostrado extremamente útil possibilitando, por meio de sua visão sinótica, ampliar a representatividade espacial das amostragens convencionais (NOVO & TUNDISI, 1988).

Desta forma, procurou-se identificar visualmente nas imagens de satélite regiões heurísticamente definidas por compartimentos do Lago em diferentes classes espectrais. Foi realizada uma classificação das bandas 2, 3 e 4 utilizando um algoritmo de classificação supervisionado por regiões baseado na distância *Bhattacharya*. Tal classificador requer interação do usuário, através do treinamento, e as amostras serão as regiões formadas na segmentação de imagens. Este método de classificação requer conhecimento do intérprete sobre o comportamento espectral dos alvos estudados (OLIVEIRA e MATAVELI, 2013).

O classificador foi aplicado após a delimitação dos corpos de água por uma máscara NDWI. O NDWI (*Normalized Difference Water Index*) corresponde à diferença normalizada entre a banda correspondente ao verde e a banda correspondente ao infravermelho próximo, foi proposto por McFeeters (1996) com o objetivo de realçar a água em relação aos outros alvos. O resultado da classificação foi satisfatório e pode ser visualizado na Figura 12. Os valores positivos do NDWI também consideraram áreas úmidas, e regiões alagadas.

Após se identificar regiões no corpo de água relativamente homogêneas, ou seja, que mantém um padrão durante o ano, definiu-se a localização das estações amostrais.

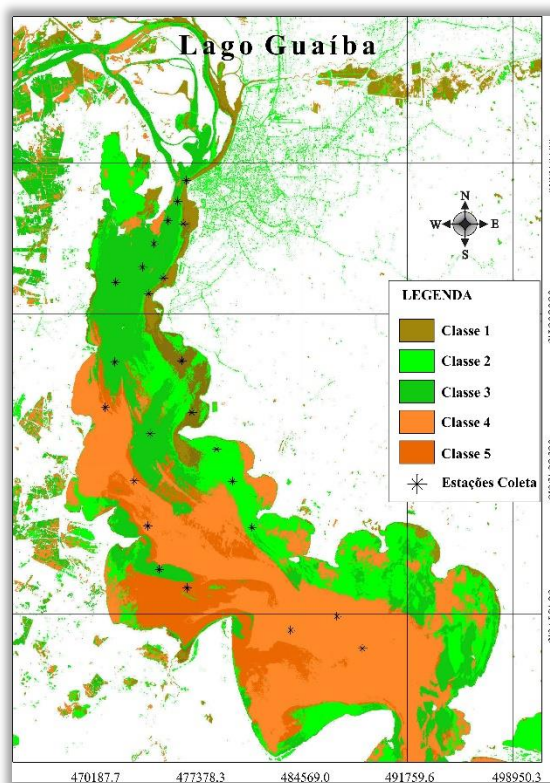


Figura 12 - Classificação de imagem OLI/Landsat-8 para definição de compartimentos aquáticos e das estações de coleta.

### 3.4 Coleta dos dados espectrais e limnológicos

A data para a campanha de coleta de dados limnológicos e espectrais *in situ* foi planejada de forma a ser concomitante com a passagem do satélite Landsat-8, e também cobrindo o fim de cada uma das estações do ano.

Foi realizada uma campanha de coleta, no dia 09 de fevereiro de 2015. Devido ao fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no ano de 2015 ter sido muito severo, causando um grande aumento de chuvas na região sul, houve o comprometimento de muitas imagens do sensor OLI devido à cobertura de nuvens e consequentemente dos demais campos. Desta forma, para caracterização do Lago Guaíba quanto à algumas variáveis ópticas, como clorofila-*a*, houve limitações, e para variáveis com TSS necessitou-se avaliar séries de imagens passadas.

A coleta dos dados foi realizada com apoio logístico da equipe do laboratório LABGEOTEC da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que forneceram auxílio técnico de um aluno, de um sensor hiperespectral (*FieldSpec® HandHeld*), garrafas para coleta

de água e equipamentos para medir variáveis auxiliares, como temperatura. A campanha também teve apoio pessoal da equipe do LAGAM (Laboratório de Geoprocessamento e Análise Ambiental). Um aparelho receptor de sinal GPS (*Global Positioning System*) foi utilizado para registrar a localização geográfica dos pontos.

No total foram definidas 25 estações de coleta (EC), as quais foram utilizadas na campanha de campo realizada no dia 9 de fevereiro de 2015. A distribuição das ECs pode ser visualizada na Figura 13.

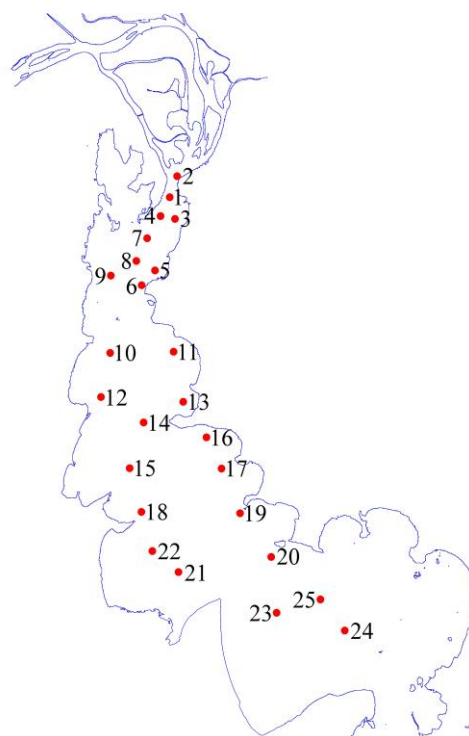


Figura 13 – Esquema com identificação das estações de coleta no Lago Guaíba.

Para coleta de dados hiperespectrais utilizou-se o espectrorradiômetro *FieldSpec® HandHeld* que possui faixa de sensibilidade de 325 e 1075 nm, nas faixas do visível e infravermelho próximo, com resolução espectral de 1 nm e campo de visada de 25° (ASD, 2015). A metodologia de coleta dos espectros de reflectância da água é descrita por Steffen *et al.* (1996). Metodicamente antes de qualquer tomada foi realizada a calibração e otimização do aparelho de forma que a reflectância do fosse obtida sob características quase idênticas de coberturas de nuvens do momento em que foi obtida a reflectância da placa Spectralon.

Os horários estabelecidos para coletas a campo foram entre 10h00m e 15h00m (horário local) para minimizar os efeitos de geometria de iluminação e visada do sensor, durante a aquisição dos dados. Para evitar a interferência do barco com a superfície da água e a influência

da radiação solar direta, o instrumento foi posicionado sobre cada estação amostral, com ângulo  $\phi_v$  de  $90^\circ$  -  $135^\circ$  com o plano de radiação incidente, e  $\theta_v$  de  $30$  a  $45^\circ$  de inclinação do sensor em relação a vertical (TANG *et al.*, 2004).

As variáveis limnológicas Total de Sólidos em Suspensão (TSS) em  $\text{mg.l}^{-1}$  e concentração de clorofila-*a* (Chl-*a*) em  $\mu\text{g.l}^{-1}$  foram coletadas em sub-superfície (aproximadamente 30 cm) com o auxílio de garrafas de 1L para posterior análise no laboratório LABGEOTEC dos constituintes opticamente ativos. A medida de turbidez foi realizado com o auxílio do equipamento multi-sensor Horiba U-10 (HORIBA, 2014). Para determinação da clorofila-*a* seguiu-se o método descrito por Mackinney (1941), em que se considera a absorvância, medida em espectrofotômetro, nos comprimentos de onda de 663 e 750 nm.

A transparência da água foi medida com a profundidade do Disco de Secchi (o disco branco é introduzido na água até desaparecer da vista do observador) e pode variar de alguns centímetros a dezenas de metros. Levou-se em conta a região da coluna d'água eufótica, que corresponde a aproximadamente 2 a 3 vezes o limite de visibilidade indicado pelo disco de Secchi, podendo variar com a capacidade da água em atenuar a radiação subaquática. A profundidade de desaparecimento do disco de Secchi não fornece dados sobre a qualidade e quantidade de radiação eletromagnética, pode-se utilizá-lo para o cálculo indireto do coeficiente vertical de atenuação (CARLSON, 1977; PREISENDORFER, 1986).

Para se determinar a quantidade de sólidos presentes em suspensão na água, foram realizadas coletas d'água em garrafas de 1L em cada estação amostral e levadas para análise no mesmo dia. A determinação dos valores de TSS em laboratório foi realizada com método de filtragem da água conforme apresentado em APHA (1998).

### **3.5 Parâmetros Limnológicos**

Além destas, outras variáveis auxiliares também foram coletadas, como temperatura da água em  $^\circ\text{C}$ , pH, condutividade elétrica em  $\mu\text{S/cm}$ , totais de sólidos dissolvidos, velocidade e direção do vento em  $\text{m s}^{-1}$ , e observação visual das condições de nebulosidade. Tais parâmetros são descritos segundo Hermes e Silva (2004):

### 3.5.1 Transparência ou claridade da água

A transparência da água é um indicador usado com frequência em ambientes aquáticos, e está intimamente ligada à atividade biológica, a qualidade da água, estado trófico e outros parâmetros, tais como sólidos em suspensão, clorofila-*a*, fósforo total, etc. (CARLSON, 1977).

### 3.5.2 Temperatura

Nos diferentes corpos d'água, a temperatura varia conforme as flutuações sazonais, sendo influenciada pela latitude, pela altitude, pela época do ano, pela hora do dia e pela profundidade. Essas variações acontecem de forma gradual, uma vez que a água pode absorver ou mesmo perder calor em alterações significativas. Temperatura é um fator determinante no direcionamento das reações que afetam os processos químicos, físicos e biológicos, exercendo, assim, uma enorme influência na atividade biológica e no crescimento de organismos aquáticos. Altas temperaturas podem provocar o aumento de reações químicas, favorecendo processos de evaporação e volatilização das substâncias presentes na água, como moléculas de agrotóxicos com alta pressão de vapor influenciando também a densidade da água.

### 3.5.3 Condutividade elétrica e sólidos dissolvidos

A condutividade elétrica depende da concentração dos íons presentes na solução: cátions e ânions. Depende também da temperatura e, por isso, essas medidas devem estar sempre associadas. A unidade básica de medida da condutividade é mhos/m (antiga) ou Siemens/m, sendo comumente expressa nos seus submúltiplos (mS/cm ou  $\mu\text{S/cm}$ ). Essa unidade pode ser usada empiricamente para a determinação de sólidos totais dissolvidos, em  $\text{mg.l}^{-1}$ . Para obtenção do valor de condutividade elétrica é usado o condutímetro.

Os sólidos totais dissolvidos (TDS) é a medida da concentração de todos os cátions, ânions e sais resultantes da combinação de cátions e ânions que se encontram dissolvidos na água e materiais em suspensão. Corresponde, portanto, à fração dos solutos suspensos que passam por filtros com poros de 2,0  $\mu\text{m}$  (0,002 cm).



### 3.5.4 pH (potencial hidrogeniônico)

O pH é uma medida do equilíbrio entre as cargas de hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ) e de íons de hidrogênio ( $\text{H}^+$ ), sendo definido como “logaritmo negativo da concentração molar de hidrogênio em uma solução”. É usado para identificar se determinada água é ácida, neutra ou básica. Em soluções neutras, como a água pura, o pH é 7,0, enquanto, em soluções alcalinas, os valores variam de 8 a 14, e, em soluções ácidas, a variação é de 1 a 6. O valor do pH muda consideravelmente conforme a hora do dia, por conta dos processos bioquímicos que ocorrem no momento, na água, que desencadeia o processo de fotossíntese.

## 3.6 Parâmetros espectrais

Para análise dos espectros de reflectância limitou-se à faixa de 400 a 900 nm, por apresentar menor quantidade de ruídos e ser de maior interesse na discriminação dos componentes opticamente ativos. Para cada estação amostral foram coletadas dez medidas e destas se tirou a média. Posteriormente, foi aplicado o filtro de média simples de uma janela de sete pontos, no Excel, a fim de reduzir os ruídos e melhorar a análise espectral. Tratados os espectros, realizou-se as seguintes técnicas:

### 3.6.1 Análise Derivativa

Utilizou-se a análise derivativa para detectar e realçar os constituintes opticamente ativos nos espectros de reflectância, e relacionar a derivada da reflectância em relação ao comprimento de onda com a concentração de determinado constituinte, como sólidos em suspensão ou clorofila. A primeira e segunda derivada foram calculadas a partir dos 25 espectros de reflectância com filtro de média de 7 pontos (bandas) de forma a evitar que os ruídos fossem amplificados no processo de diferenciação (TSAI E PHILPOT, 1998). Para a equação de derivada utilizou uma separação entre bandas de 3nm (resolução). A Figura 14 exemplifica o resultado da aplicação da primeira derivada no espectro de reflectância.

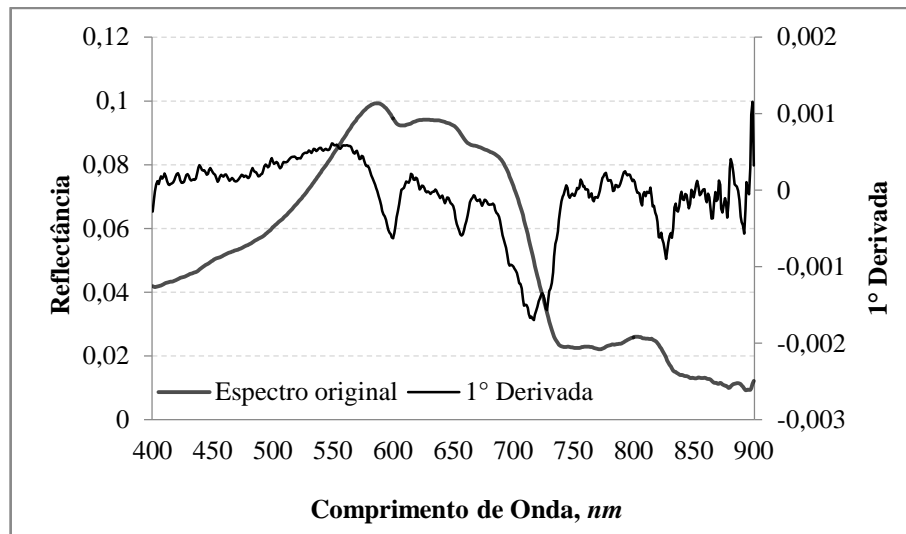


Figura 14 - Exemplo de reflectância e primeira derivada. Fonte: trabalho de campo.

### 3.6.2 Remoção do Contínuo

Utiliza-se a remoção do contínuo para normalizar espectros de reflectância e comparar as feições de absorção individuais a partir de uma referência comum. A remoção do contínuo foi realizada no software ENVI 5.0, onde o contínuo foi removido por meio da divisão do valor de reflectância para cada  $\lambda$  da feição de absorção pela linha contínua (reta) no comprimento de onda correspondente. Assim, o primeiro e o último valor da feição são removidos por serem iguais a 1. As curvas resultantes têm valores entre 0 e 1 (Figura 15).

Para isolar as feições de absorção definiu-se um limite inferior e um superior de comprimento de onda para a banda de absorção. A escolha dos limites das bandas foi feita de modo a ressaltar as feições de absorção dos elementos (BREUNIG *et al*, 2007).

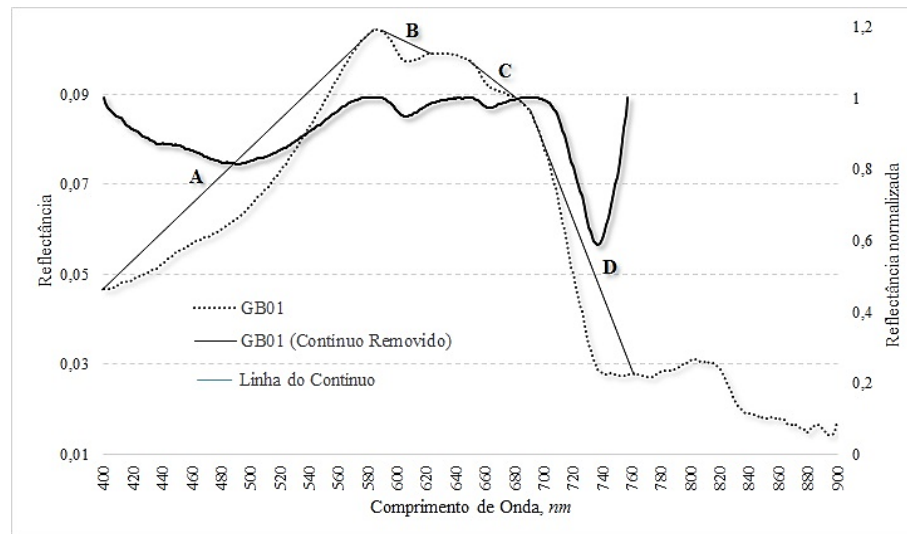


Figura 15 - Bandas de absorção (A, B, C e D) no espectro de reflectância da EC GB01 e espectro normalizado após remoção da linha do contínuo. Fonte: Trabalho de campo.

### 3.6.3 Aquisição e processamento das imagens dos sensores OLI/Landast-8 e LISS-III ResourceSat-2

Embasado na premissa de que as maiores concentrações de sólidos em suspensão (principalmente sedimentos minerais), produzem uma maior reflectância nas faixas do visível e infravermelho próximo (Lodhi *et al*, 1997; Kirk, 2011), utilizou-se uma série de imagens da banda 4 (red) do sensor OLI/Landsat-8 para se analisar qualitativamente o padrão espacial e temporal da pluma de sólidos inorgânicos em suspensão (Tabela 4).

Desta forma, as datas das imagens escolhidas foram verificadas por meio do *Global Visualization Viewer* (GloVis), um visualizador de imagens baseado em navegador para conjuntos de dados disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS), disponível por meio do endereço eletrônico: <<http://glovis.usgs.gov>>. Este serviço permite a criação de arquivos de texto contendo uma lista com as imagens a serem adquiridas. Em função dos critérios estabelecidos foram selecionadas 3 cenas do ano de 2013, 6 cenas para 2014 e 3 cenas para 2015, com o mínimo de cobertura de nuvens possível.

Tabela 4 - Estatística descritiva da série de imagens utilizadas na análise com dados de precipitação acumulados 16 dias anteriores a aquisição e respectivas média de reflectância para todo o Lago Guaíba.

| <b>Data</b>      | <b>Precipitação (mm)</b> | <b>Média B4 OLI</b> | <b>Desv Pad</b> | <b>Min</b> | <b>Max</b> |
|------------------|--------------------------|---------------------|-----------------|------------|------------|
| <b>1-out-13</b>  | 130,2                    | 0,0945              | 0,00501         | 0,05450    | 0,11930    |
| <b>18-nov-13</b> | 163,0                    | 0,1256              | 0,01061         | 0,08160    | 0,15520    |
| <b>4-dez-13</b>  | 63,3                     | 0,1066              | 0,01263         | 0,06530    | 0,15620    |
| <b>5-jan-14</b>  | 17,1                     | 0,0867              | 0,01857         | 0,00000    | 0,13770    |
| <b>21-jan-14</b> | 47,3                     | 0,0683              | 0,00737         | 0,04710    | 0,14190    |
| <b>6-fev-14</b>  | 21,0                     | 0,0773              | 0,01345         | 0,00000    | 0,13100    |
| <b>27-abr-14</b> | 56,4                     | 0,0843              | 0,00674         | 0,06200    | 0,12910    |
| <b>20-out-14</b> | 167,4                    | 0,1114              | 0,01062         | 0,00000    | 0,24410    |
| <b>07-dez-14</b> | 53,0                     | 0,0850              | 0,04138         | 0,00770    | 0,55350    |
| <b>24-jan-15</b> | 105,5                    | 0,0937              | 0,00845         | 0,07520    | 0,16150    |
| <b>25-fev-15</b> | 48,3                     | 0,0621              | 0,00493         | 0,02260    | 0,16650    |

Com a seleção das imagens e por meio do serviço *Higher Level Science Data Products* disponibilizado pela USGS, o qual permite a aquisição sob demanda de produtos derivados das bandas do sensor OLI foi realizado o pedido de conversão para reflectância de superfície e correções atmosférica e geométrica, sendo adquiridas as imagens escolhidas na etapa anterior por meio da página do *Center Science Processing Architecture* (ESPA), disponível em: <<https://espa.cr.usgs.gov/>>.

Desenvolvido pela Índia, o satélite Resourcesat-2 conta com três câmeras imageadoras: LISS-III, LISS-IV e AWiFS, sendo que neste trabalho se utilizou a primeira, cuja características básicas são visualizadas na Tabela 2, da subseção 2.7. A imagem do sensor LISS-III/Resourcesat-2 do dia 08 de fevereiro de 2015 (Orbita/Ponto: 328/100), foram adquiridas no catálogo de imagens do INPE, o qual as disponibiliza gratuitamente. Como a imagem do sensor OLI do dia de coleta de dados limnológicos apresentaram nuvens, foi utilizado este sensor para se analisar a resposta espectral em função dos constituintes opticamente ativos e estimar sua concentração e distribuição em todo o Lago Guaíba. No subcapítulo abaixo são apresentados os processos necessários antes de se utilizar as imagens deste sensor.

### 3.6.3.1 *Processamento digital das imagens LISS-III:*

O pré-processamento da imagem LISS-III (Figura 16) envolveu as etapas de correção radiométrica (para remoção dos efeitos atmosféricos) e correção geométrica (registro). A calibração radiométrica e a correção dos efeitos da atmosfera são passos fundamentais no processo de correção radiométrica, para se obter valores de parâmetros físicos (radiância e

reflectância) das imagens passíveis de serem interpretados espectralmente, comparados e com o mínimo de influência de gases da atmosfera (MARKHAM e BARKER, 1986; JENSEN, 2011).

Para isso, foi utilizado o módulo de correção atmosférica *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) presente no software ENVI 5.3. O módulo exige a entrada de dados orbitais calibrados radiometricamente e que estejam em valores de radiância aparente ( $mW/(cm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$ ). O FLAASH incorpora o código de transferência radioativa MODTRAN4 e requer que alguns parâmetros sejam informados, como: a latitude e longitude da cena, tipo de sensor, elevação média do terreno, data e horário de captura da cena e parâmetros para o modelo atmosférico (MATTHEW et al., 2002).

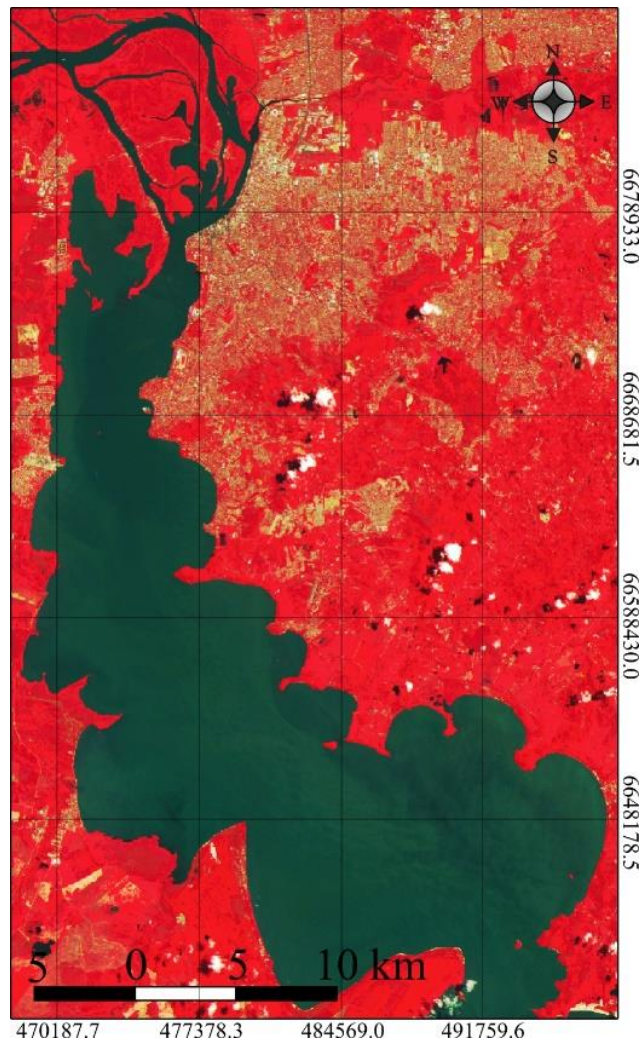


Figura 16 - Imagem LISS-III/ResourceSat-2 do dia 08 de fevereiro de 2015, composição RGB432. (Orbita/Ponto: 328/100).

Para a imagem LISS-III obtida os parâmetros de latitude e longitude são: -29,75316 e -51,59228; Sensor LISS-III; elevação média do terreno: 821 Km; modelo atmosférico: *Mid-Latitude Summer*. O resultado final foi uma imagem em reflectância de superfície, que foi utilizada para estimativa dos parâmetros limnológicos coletados em campo.

O processo de correção geométrica das imagens adquiridas foi realizado com o método de registro de imagem do ENVI 5.3, com base em cenas ortorretificadas (TM/Landsat) da área de estudo. O desenvolvimento destas etapas contribuiu para o sucesso nos resultados, que depende diretamente da utilização de dados, os mais puros o possível e, a refletância dos alvos com o mínimo de ruído.

### **3.7 Espacialização das variáveis limnológicas coletadas em campo**

As concentrações das variáveis limnológicas coletadas no dia 09 de fevereiro de 2015, para as 25 estações de coleta, após mensuradas em laboratório tiveram seus valores inseridos em um banco de dados geográfico do *software* SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), versão 5.4. Cada variável foi interpolada pelo método da média ponderada pela inverso do quadrado da distância, em que o valor de cada ponto da grade retangular gerada é calculado a partir da média ponderada das cotas dos 8 vizinhos mais próximos a este ponto, por uma função que considera a distância do ponto cotado ao ponto da grade.

Utilizou-se um expoente de peso 2 (quanto maior o expoente, maior a influência da distância). Posteriormente o *raster* gerado para cada variável foi utilizado para o fatiamento em classes temáticas.

### **3.8 Testes estatísticos de correlação**

Para a análise dos dados realizou-se inicialmente estatística descritiva, em que se calculou o mínimo, máximo, média e variância dos valores de reflectância para as estações amostrais e dos valores referentes a todas variáveis limnológicas (pH, CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), TDS ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), TUR (NTU), TSS ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), Chl-a ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ), Temperatura água ( $^{\circ}\text{C}$ ), Temperatura Ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), Transparência (cm) e Profundidade (m)).

Posteriormente as amostras limnológicas foram correlacionadas com os dados de sensoriamento remoto hiperespectral para determinar se existe associação entre essas variáveis

e avaliar quais os comprimentos de onda que estariam sendo influenciados de forma mais significativa para cada variável limnológica (Chl-*a*, TSS, TUR, DS). Para se avaliar a correlação foi utilizado o coeficiente de correlação ( $r$ ), aplicado para todos os comprimentos de onda. Este coeficiente pode variar entre -1 e +1, sendo que, valores negativos de  $r$  apontam para uma correlação inversa e os valores positivos para uma correlação direta (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Para correlação foi realizado teste de hipótese que serve para avaliar a significância do coeficiente de correlação. Geralmente testa-se a hipótese nula de que a correlação na população é  $\rho = 0$ , ou seja, não existe correlação, utilizando para isso a distribuição  $t$ . Mais detalhes sobre o teste podem ser encontrados em Callegari-Jacques (2003).

É necessária muita cautela na interpretação do  $p$ -valor, uma vez que sua medida é bastante influenciada pelo tamanho da amostra. Amostras grandes tendem a produzir  $p$ -valores pequenos, ainda que o efeito observado não tenha grande impacto, enquanto amostras pequenas tendem a produzir  $p$ -valores grandes (GARDNER e ALTMAN, 1986).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Dados de precipitação e de reflectância da água

As chuvas na área de captação do Lago Guaíba provêm em sua maioria de sistemas frontais e podem oscilar entre 1.500 a 1.800 mm anuais. A partir dos termopluviogramas (Figura 17) é possível observar as características climáticas e a relação entre as temperaturas e as precipitações médias mensais medidas na estação meteorológica de Porto Alegre (83967) para os anos 2013, 2014 e 2015. Os termopluviogramas também apresentam a média mensal histórica de precipitação medidas na mesma estação entre 1961 e 2015.

O ano de 2013 (Figura 17a) apresentou um acumulado de 1.463 mm, sendo que o total de chuvas de cada mês em sua maioria não ultrapassou a média mensal histórica e as temperaturas médias mensais variaram entre 13,6 e 24,9°C. No ano de 2014 (Figura 17b) o acumulado de chuvas foi superior (1.730 mm). Nos meses de junho e julho foram observados os maiores acumulados de chuva na estação de Porto Alegre, mas apesar disso estão nos padrões climatológicos normais para o sul do estado. A partir do mês de setembro, sob a influência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), com intensidade fraca, as precipitações se mantiveram um pouco acima do padrão até o fim da primavera. As médias de temperatura mensais também foram superiores às observadas em 2013 (entre 15 e 26°C) (INMET, 2015).

A Figura 17c mostra que os acumulados médios mensais de precipitação para o ano de 2015 foram de 1.820 mm, superior à média mensal histórica, devido à ocorrência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) que teve forte intensidade no período causando grande aumento de chuvas nesta região, principalmente nos meses de inverno e primavera. As médias de temperatura nos de 2014 e 2015 foram relativamente superiores às observadas no ano de 2013, ano em que não houve ocorrência do El Niño (INMET, 2015).



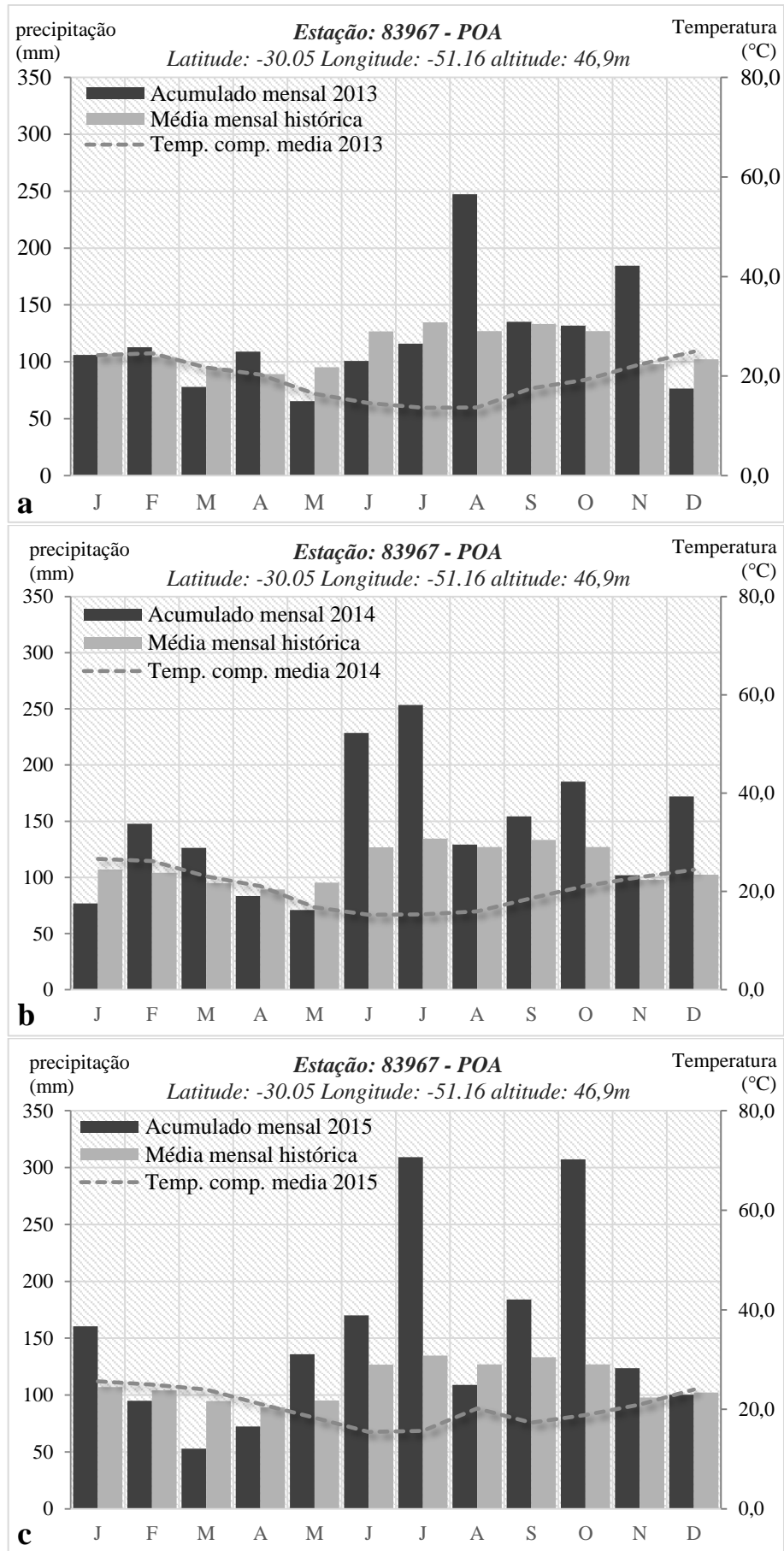


Figura 17 – Termopluviogramas de precipitação pluviométrica mensal acumulada, Porto Alegre - RS

A análise do montante de chuva medido na estação meteorológica é importante para a análise das variáveis limnológicas, pois além de verificar as interferências desta no meio aquático do lago, esta pode influenciar de maneira direta na concentração e na dinâmica de algum constituinte dentro do corpo d'água. Destaca-se também a possível interferência na reflectância espectral, pois a água da chuva atua no transporte de material particulado da bacia hidrográfica para o interior do corpo d'água (CORAZZA *et al.*, 2013).

Embasado na premissa de que as maiores concentrações de sólidos em suspensão (principalmente sedimentos minerais), produzem uma maior reflectância nas faixas do visível e do infravermelho próximo (LODHI *et al.*, 1997; KIRK, 2011) estabeleceu-se uma relação entre o montante de chuvas, ocorridas na região nos 16 dias anteriores<sup>2</sup> à data de passagem do satélite Landsat-8, e a reflectância espectral das bandas deste sensor.

Neste sentido, testes realizados mostraram uma boa relação com a média de reflectância dos pixels correspondentes a todo Lago Guaíba (para as datas correspondentes a Tabela 4), principalmente para a banda do vermelho (Figura 18). Os dados de reflectância indicaram resultados significativos para o intervalo de 95% de confiança.

Trabalhos realizados no reservatório Passo Real por Pereira Filho e Galvão (1997) e Pereira Filho *et al.* (2009) identificaram maior reflectância na faixa espectral do vermelho, que é o comprimento mais afetado pelos sólidos em suspensão (KIRK, 2011).

A média da reflectância da água do Lago Guaíba na banda do vermelho do sensor OLI, para os meses analisados (Tabela 4), variou de 0,08 a 0,12. Os meses com os menores valores de reflectância média corresponderam aos meses em que o montante acumulado de chuvas também foi menor, como em dezembro de 2013 e janeiro, fevereiro e abril de 2014. Para os meses de outubro de 2013 e 2014, quando houveram registros de chuvas de 130 e 167 mm, respectivamente, a reflectância média das águas do Guaíba também se mostrou acima da média da série analisada.

---

<sup>2</sup> O período testado condiz com a resolução temporal do sensor de 16 dias, e o tempo de residência da água do Guaíba de 10 dias, segundo Toldo Jr. & Almeida (2009).

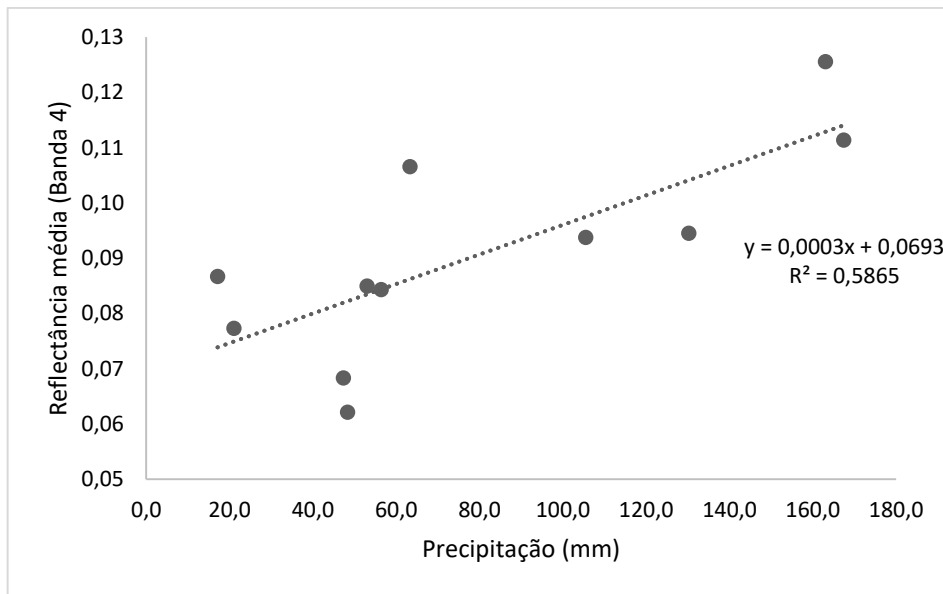


Figura 18 - Relação entre a reflectância média da água (no Lago inteiro) e dados de precipitação acumulados médios nos 16 dias anteriores a aquisição das mesmas. Fonte: INMET (2014;2015) e USGS.

Corazza *et al.*, (2013) observou no Lago Guaíba que a baixa reflectância e homogeneidade das características da água em maio de 2013 (coleta em campo) também pode estar ligada à baixa precipitação mensal acumulada (37,2mm) e velocidades do vento de 1,7 km/h, nos 30 dias que antecederam o trabalho de campo.

Apesar dos dados estatísticos neste trabalho mostrarem que há uma relação entre as variáveis, torna-se necessário uma validação com dados obtidos *in situ* de medidas de concentração de sedimentos e assim a correlação destas medidas com dados de sensoriamento remoto para se obter uma relação quantitativa mais fiável.

A Figura 19 apresenta os valores de precipitação diários no período de 16 dias anteriores a data de coleta de campo, que se deu em concomitância a aquisição da imagem OLI/Landsat-8 e um dia posterior a aquisição da imagem LISS-III/ResourceSat-2.

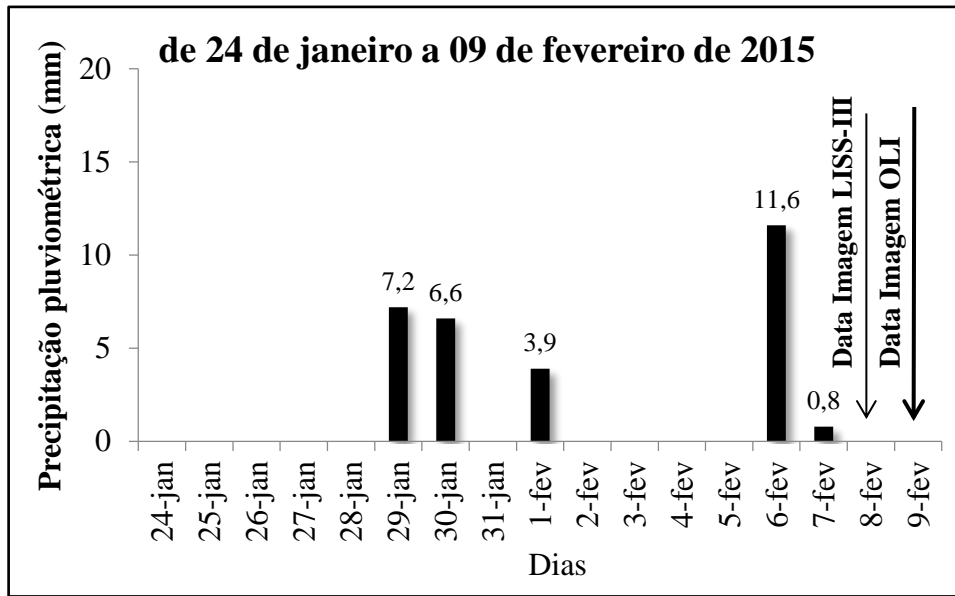


Figura 19 - Precipitação pluviométrica nos 16 dias anteriores a coleta de campo (09/02/2015) e a passagem dos satélites.

Observa-se que para o mês de fevereiro de 2015, mês da coleta de campo, a precipitação acumulada para o mês foi de 95 mm, conforme registrada pela estação meteorológica do INMET de Porto Alegre (83967). Já o registro das chuvas na estação nos 16 dias anteriores a passagem do satélite foi de 30,1 mm, conforme a Figura 19.

#### 4.1.1 Análise espacial e temporal da distribuição da reflectância no Lago Guaíba

A variação espacial e temporal da série temporal da reflectância, na banda do vermelho (640 – 670 nm), a partir de imagens do sensor OLI/Landsat-8, mostra que os maiores valores de reflectância estão relacionados com a maior carga de sólidos inorgânicos em suspensão no corpo d'água, Figura 20.

Os maiores valores de reflectância, entre 0,12 a 0,16 (cores quentes), estão relacionados à estação do ano de maior acumulado de chuvas próximo ao Lago (Figura 17 e 18). Os meses de outubro, novembro e dezembro tiveram os maiores valores de reflectância. Constata-se, desta forma, uma maior contribuição de sólidos em suspensão proveniente dos tributários. Em relação aos meses de janeiro, fevereiro e abril, verificou-se menores valores de reflectância, 0,04 a 0,08 (cores frias), período em que volume de chuvas é inferior à média anual o que

refletiu, conseqüentemente, em uma menor descarga de sólidos em suspensão pelos tributários e bacia de captação.

Andrade Neto (2012) em estudo sobre a variabilidade temporal da descarga sólida em suspensão no Guaíba, apontou os maiores valores de sólidos em suspensão para os meses de julho, outubro, novembro e dezembro. Estes correspondendo também aos meses de maior vazão registrada no Lago. Já nos meses de janeiro a maio (verão e outono), a descarga fluvial dos tributários apresentou-se baixa, em comparação aos outros meses.

Wachholz (2007) relacionou a reflectância na banda do vermelho de uma série temporal de imagens dos sensores CCD/CBERS-2 e TM/Landsat-5 com o TSS, e verificou uma tendência das classes de alta concentrações de TSS terem participação crescente com o aumento da reflectância. Wachholz *et al.* (2009) em trabalho realizado em reservatórios em cascata no alto Jacuí mostraram que a maior quantidade de chuvas na bacia hidrográfica do alto Jacuí proporcionou maiores reflectâncias em comprimentos de onda na faixa do vermelho (banda 3 do sensor TM), definindo desta maneira maior número de compartimentos aquáticos no reservatório. Observou que no sistema em cascata há uma diminuição da reflectância no sentido montante jusante, relacionado possivelmente à precipitação de sólidos em suspensão.

No Lago Guaíba os sólidos em suspensão tendem a seguir a direção de fluxo no sentido do canal de navegação, e à medida que a água se desloca para áreas mais centrais, parte desse material é depositado no fundo do corpo d'água (NICOLODI, 2010). A dinâmica pode ser evidenciada mesmo em dias com ausência de pluviosidade, sólidos em suspensão devido a ressuspensão do fundo, em maior intensidade nas partes rasas, próximas à margem, e em direção e intensidade diretamente proporcional ao sentido do vento (NICOLODI, 2007). Observa-se que existe uma tendência das altas reflectâncias estarem mais concentradas na margem esquerda do Lago, porção Oeste e Sudoeste. Essa porção do Lago é caracterizada por Nicolodi (2010) como um ambiente onde predominam condições de erosão ou não deposição de sedimentos finos, por ação de ondas.

Segundo Livi (1998) os ventos em Porto Alegre são predominantemente das direções leste e Sudeste. Na série temporal analisada ficou difícil estabelecer algum padrão de direção de ventos já que não há uma continuidade nas datas, entretanto se verificou que nos meses de janeiro e fevereiro ventos de direção norte e nordeste predominaram. Nicolodi (2007) verificou nos meses referentes as estações de primavera e verão os ventos predominantes foram de

sudeste e leste. As velocidades dos ventos na série de imagens apresentaram intensidade variável, ficando abaixo de 10km/h. Em um estudo realizado por Paz *et al.* (2005), os autores ressaltaram que ventos de baixa intensidade, com velocidades inferiores a 10km/h, exerceram baixa influência no padrão de circulação da água no Lago Guaíba, prevalecendo a direção de fluxo pelo canal de navegação.

Nas regiões próximas às margens e enseadas observou-se que a reflectância não segue o mesmo padrão daqueles observados no centro do lago, e próximas do canal de navegação. Paz *et al.*, (2005) observaram que regiões próximas à margem, entre a ponta ao sul do município de Guaíba (próximos a ECs 9 e 10, Figura 13) ocorre uma zona de pouca circulação da água, com o escoamento principal deslocado para o centro/leste do Lago. As enseadas ao sul do Lago também são classificadas como regiões onde ocorre praticamente estagnação do fluxo. A reflectância pode estar assim condicionada nestas regiões aos padrões de circulação e alterações na velocidade e intensidade do vento.

Desta forma, a distribuição da reflectância em diferentes épocas do ano permite verificar a sazonalidade das concentrações de sólidos inorgânicos em suspensão no Lago e se essa sazonalidade pode estar associada à fenômenos climáticos (ventos, chuvas, El Niño e La Niña), sabendo que parâmetros como velocidade e intensidade de ventos, interferem na mistura da água e conseqüentemente, na ressuspensão de sólidos (NICOLODI, 2010; PAZ *et al.*, 2005; CORAZZA, 2015).

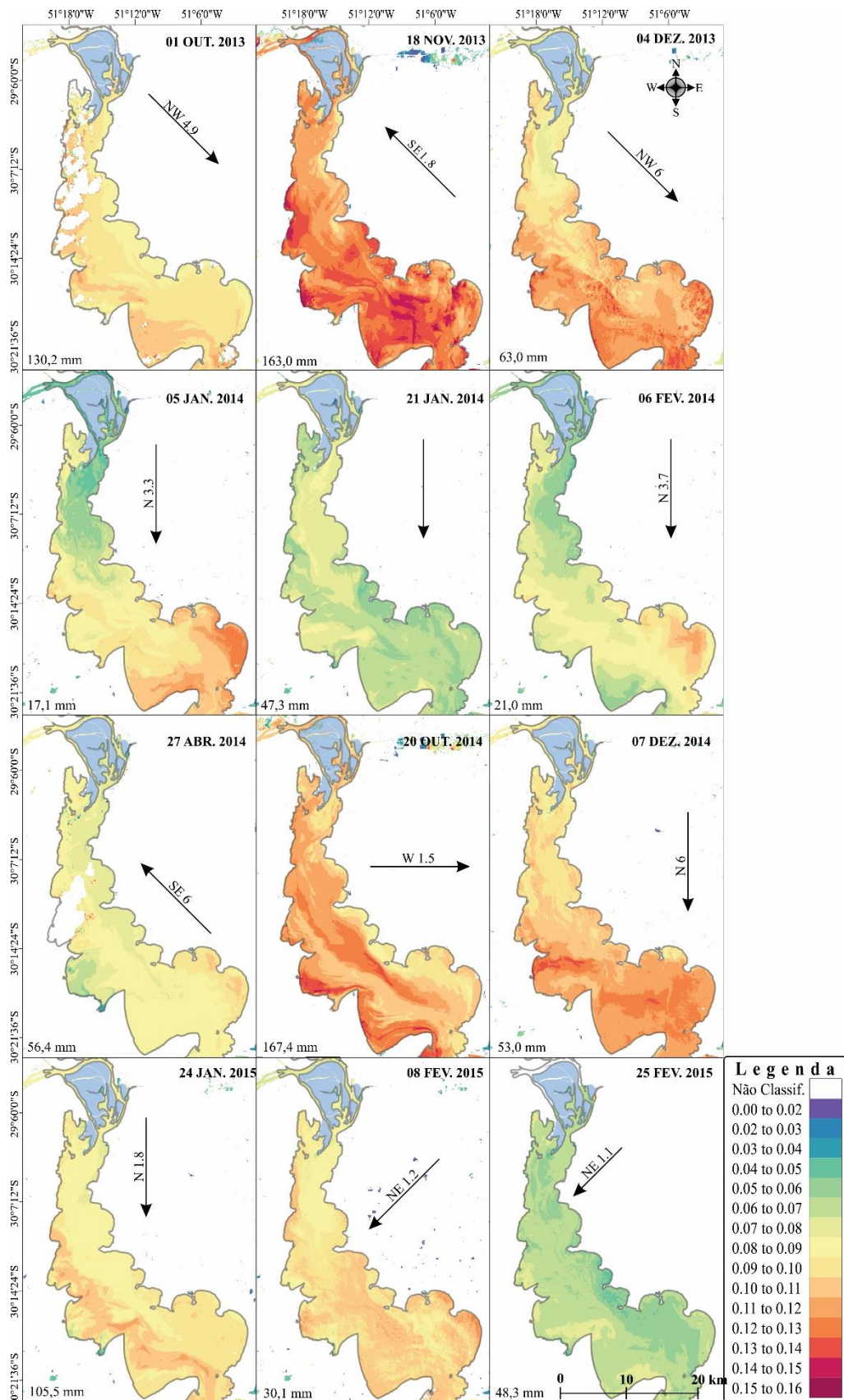


Figura 20 - Variação espaço-temporal da reflectância na banda 4 do sensor OLI/Landsat-8, direção e intensidade dos ventos em km/h e precipitação acumulada 16 dias anteriores ao imageamento. Fonte: USGS; INMET, 2015.

## 4.2 Variáveis Limnológicas

Os dados limnológicos coletados no dia 09 de fevereiro de 2015 foram organizados e pré-avaliados por meio de estatísticas descritivas. Essa etapa foi importante para fornecer um resumo conciso dos dados, permitindo uma visão da totalidade da variação dos mesmos e identificando, assim, possíveis valores inconsistentes (*outliers*). A Tabela 5 apresenta as estatísticas descritivas dos dados limnológicos coletados.

Tabela 5 - Estatísticas descritivas das variáveis limnológicas coletadas na campanha de campo em fevereiro de 2015 no Lago Guaíba.

| Estatísticas descritivas                 |    |        |        |       |               |           |                           |
|--|----|--------|--------|-------|---------------|-----------|---------------------------|
| Variáveis                                | N  | Mínimo | Máximo | Média | Desvio Padrão | Variância | Referência                |
| pH                                       | 25 | 6,19   | 7,21   | 6,73  | 0,28          | 0,08      | 6,0 a 9,0                 |
| CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )           | 24 | 51,00  | 76,00  | 60,63 | 5,32          | 28,33     | -                         |
| TDS ( $\text{mg}/\text{L}$ )             | 25 | 27,00  | 55,00  | 33,00 | 5,37          | 28,83     | -                         |
| TUR (NTU)                                | 25 | 24,10  | 45,60  | 35,08 | 6,04          | 36,47     | 100 NTU                   |
| TSS ( $\text{mg}/\text{L}$ )             | 25 | 4,00   | 24,00  | 12,53 | 5,59          | 31,30     | 500 $\text{mg}/\text{L}$  |
| Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{g}/\text{L}$ ) | 25 | 3,37   | 51,36  | 19,30 | 12,93         | 167,07    | 30 $\mu\text{g}/\text{L}$ |
| Temperatura água                         | 25 | 27,30  | 30,90  | 28,48 | 0,93          | 0,86      | -                         |
| Temperatura Ar                           | 23 | 25,30  | 33,00  | 28,96 | 2,50          | 6,23      | -                         |
| Transparência (cm)                       | 25 | 40,00  | 78,00  | 56,96 | 11,00         | 120,96    | -                         |
| Profundidade (m)                         | 25 | 0,91   | 12,19  | 3,90  | 2,58          | 6,64      | -                         |

Obs: Os valores de referência segundo a resolução CONAMA 357/2005 para classe II.

### 4.2.1 Teste de normalidade

Foi utilizado o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* (Figura 21) para verificar se a distribuição de probabilidade associada ao conjunto de dados pode ser aproximada pela distribuição normal (ou seja, gaussiana), para um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05. O teste apresentou para as variáveis limnológicas TSS e TUR um  $W_{\text{Calculado}}$  maior que  $W_{(0,05;25)} = 0,918$  (tabelado), sendo assim, apresentam distribuição normal considerando o nível de significância estatística ( $\alpha$ ) de 0,05. Para os valores de concentração de clorofila-*a* o teste apresentou  $W$  inferior ao tabelado e significância estatística menor que 0,05, sendo assim, pode-se afirmar que a amostra não provém de uma população normal.



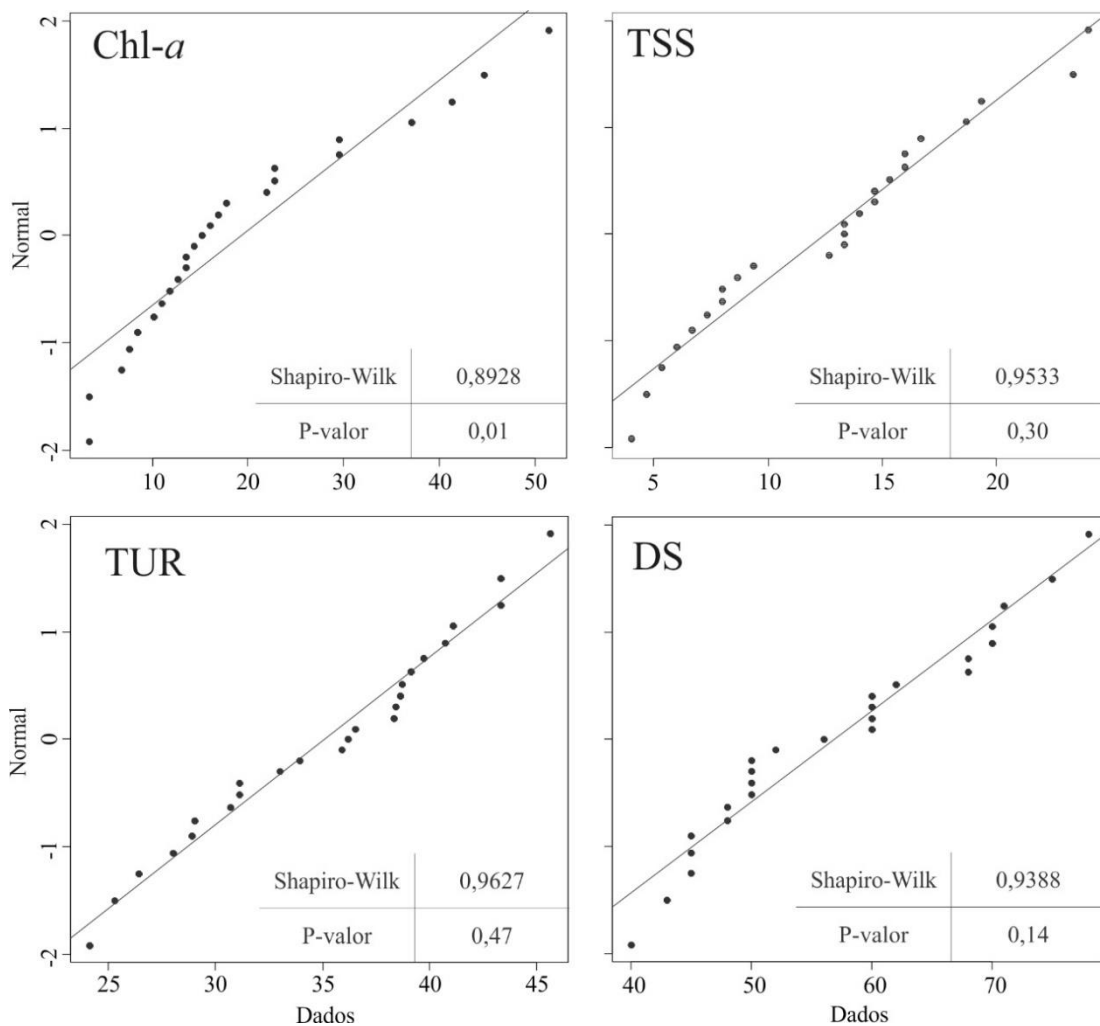


Figura 21 - Teste estatístico de normalidade Shapiro-Wilk, para as amostras limnológicas.

A Figura 22 apresenta a distribuição espacial da variável limnológica clorofila-*a* em  $\mu\text{g. L}^{-1}$ , na superfície do Lago Guaíba, resultado da média ponderada (inverso da distância ao quadrado) das 25 estações de coleta. É possível verificar nas cores frias as concentrações mais baixas de Clorofila-*a*, distribuídas com maior intensidade na porção norte do lago com variação entre 3 a 20  $\mu\text{g. L}^{-1}$ . As maiores concentrações estão localizadas mais ao sul. Entretanto se observa algumas concentrações maiores no setor norte (em torno 30 a 50  $\mu\text{g. L}^{-1}$ ), próximo à região de desembocadura do escoamento afluente do Delta do Jacuí (ECs 1, 2, 3 e 4), conforme orientação do canal de navegação, sendo a região que apresenta as velocidades de escoamento mais elevadas em todo o Lago Guaíba, segundo Paz *et al.* (2005). As ECs que possuem as menores concentrações são a 1, 7 e 9 (entre 3 e 6,74  $\mu\text{g. L}^{-1}$ ), e as maiores são 8, 20 e 25 (entre 41 e 51  $\mu\text{g. L}^{-1}$ ).

Apesar desta época do ano as florações de algas serem mais comuns (DMAE, 2011) não houve registros no dia de coleta. O favorecimento das florações de algas em diferentes regiões

do Lago está relacionada à hidrodinâmica e à morfometria do próprio Lago. Ao Norte e no canal de navegação, tem-se o fluxo preferencial na direção sul, com influências sobre o arraste e ressuspensão de partículas, desfavorecendo a penetração de luz. Contribuem para essa dificuldade, as regiões com águas mais profundas. As enseadas da margem esquerda possuem águas menos profundas e mais distantes do canal de navegação. A característica de enseada permite menor influência do fluxo e dos ventos, tornando as águas mais calmas e propícias à sedimentação de partículas e mais transparentes, principalmente no verão. Desta forma, são normalmente nestas regiões onde se iniciam as florações de algas (DMAE, 2011).

Assim, pode-se observar que a concentração de clorofila-*a* próximos as enseadas (EC's 12, 18 e 20) são ligeiramente maiores. Corazza (2015) constatou maiores concentrações de clorofila-*a* (entre 10 e 13  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) próximos aos centros urbanos em março de 2012 e abril de 2013, estando ligadas à maior disponibilidade de nutrientes (nitrogênio e fósforo) presentes nos efluentes urbanos, o que favorece o desenvolvimento fitoplanctônico. A EC com maior concentração de Chl-*a* foi a 8 ( $>44 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), localizado na lateral esquerda do canal de navegação, registro de profundidade de 1,2 m, neste ponto há mudança significativa na velocidade do escoamento em relação ao canal (Paz *et al.*, 2005).

Corazza (2015) verificou que as maiores concentrações de Chl-*a* não ocorrem necessariamente onde há maior oferta de nutrientes provindos de despejos de esgoto, ou seja, próximos aos centros urbanos, mas sim nas áreas onde além de nutrientes, há disponibilidade de luz no interior do corpo hídrico, menores velocidades do fluxo da água e que sejam protegidas do vento, caso das enseadas.

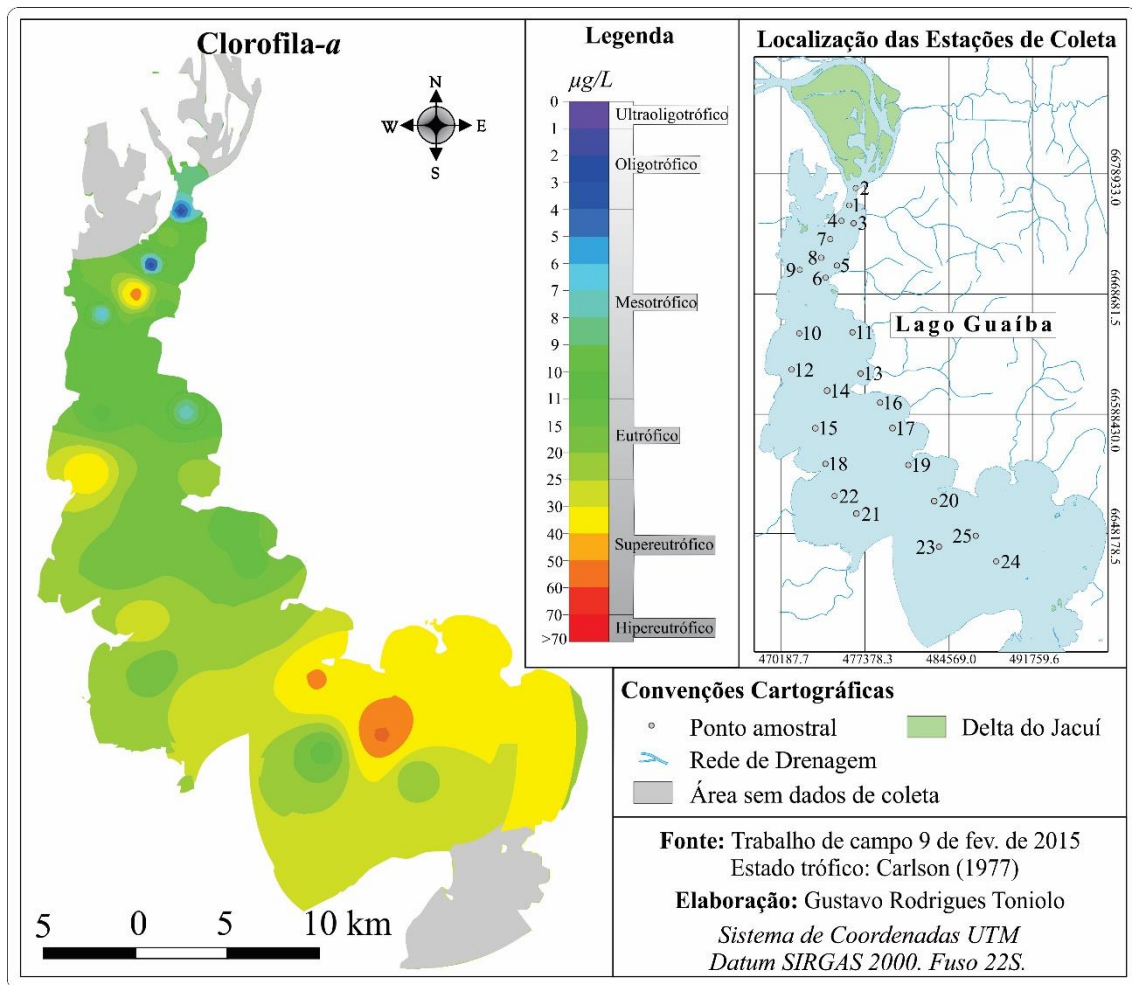


Figura 22 - Distribuição espacial da clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) em 09 de Fev. de 2015, Lago Guaíba.

A transparência da água do Guaíba, verificada pela interpolação pelo inverso da distância ao quadrado dos dados do Disco de Secchi (Figura 23), variou de 40 a 78 centímetros, caracterizando o corpo d'água como um sistema eutrófico a hipereutrófico (CARLSON, 1977). A variação da transparência ocorreu no sentido norte-sul, com as maiores transparências verificadas ao norte e as menores ao sul do lago. As ECs onde o Disco de Secchi registrou as maiores transparências foram a 1 e a 5 com 60 e 78 cm, respectivamente. Já nas ECs 12 e 14 foram encontradas as menores transparências, 40 e 62 cm, respectivamente. A variação da transparência pode ser explicada, dentre outros fatores pelo tempo de residência da água, em que a carga de sólidos em suspensão provindos de precipitações anteriores a data de coleta (6 de fevereiro) já está se dispersando para o sul do Lago. Além disso, com a ausência de pluviosidade, os sólidos em suspensão podem ser devido a ressuspensão do fundo pela ação do vento, em maior intensidade nas partes rasas próximas à margem (NICOLODI, 2007)

Tebaldi (2015) utilizando o método de interpolação do inverso do quadrado da distância para 14 estações amostrais no Lago Guaíba, em dezembro de 2013, encontrou também maiores transparências no setor à montante e as menores também nas ECs 12, 18 até 19.

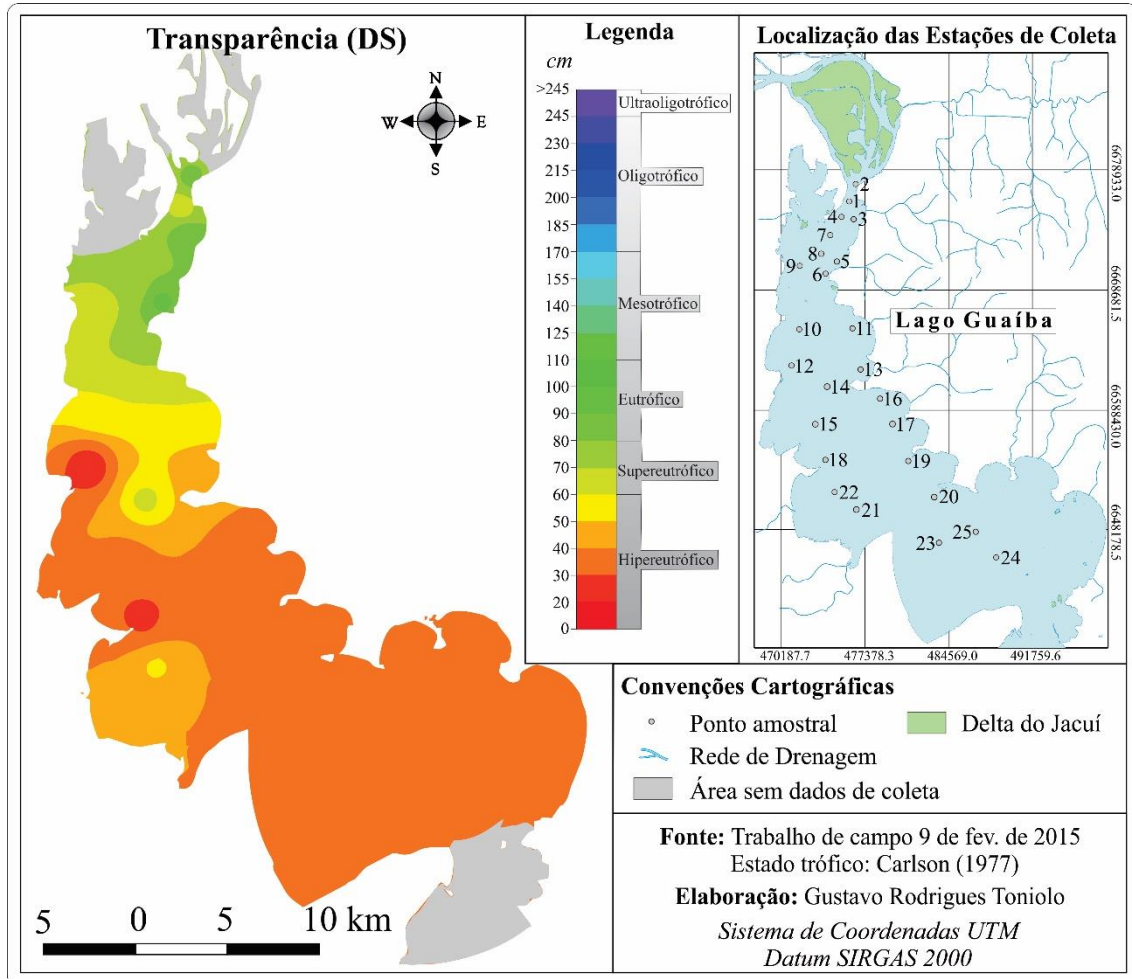


Figura 23 - Distribuição espacial da transparência (cm), em 09 de fev. de 2015, Lago Guaíba.

A Figura 24 apresenta os dados interpolados pelo inverso da distância ao quadrado de concentração de sólidos totais em suspensão no Lago Guaíba. Observa-se que existem variações nas quantidades de sólidos suspensos. A montante estão os menores valores (entre 4 e 10  $\text{mg.L}^{-1}$ ), e os maiores valores concentram-se nos setores correspondentes ao EC 10 (24  $\text{mg.L}^{-1}$ ), na EC 18 (23,33  $\text{mg.L}^{-1}$ ) e a jusante do Lago. Na margem esquerda do Lago, ao contrário da margem direita, há duas regiões onde a concentração de sólidos é superior à média relativa as ECs 10 e 18. Estes valores superiores podem estar relacionados as características do ambiente que, segundo Nicolodi (2010), compõe um fundo erosional, em que predominam as condições de erosão ou não deposição de sedimentos finos, por ação das ondas com velocidades orbitais superiores a 15 cm/s do tempo.

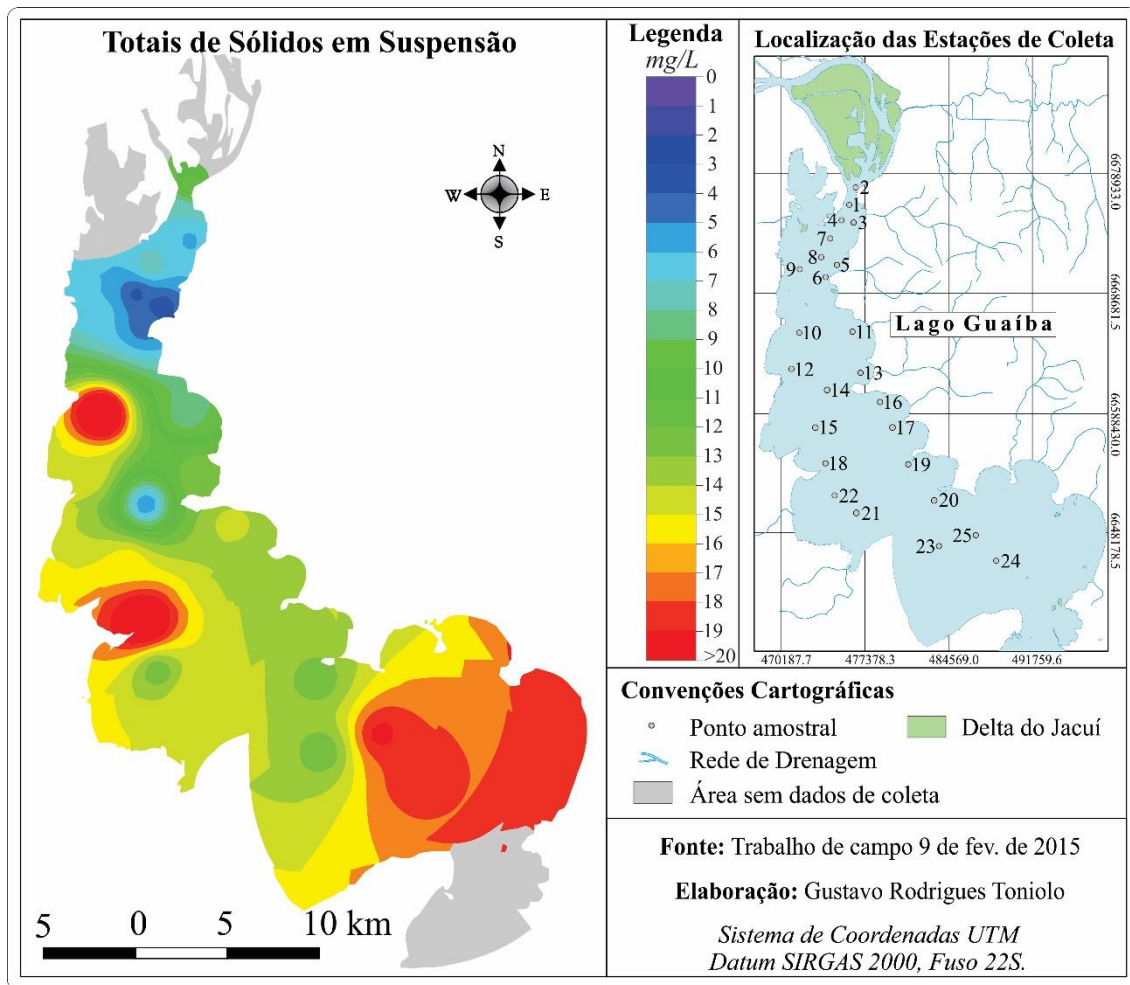


Figura 24 - Distribuição espacial dos totais de sólidos em suspensão, em 09 de Fev. de 2015, Lago Guaíba.

A turbidez (Figura 25) apresentou um padrão de distribuição similar ao de totais de sólidos em suspensão, variando entre 24 e 45 NTU. Os valores mais elevados ficaram restritos a porção sul do Lago e centro oeste onde também se observaram as maiores concentrações de sólidos e clorofila-*a*. A região mais ao norte apresentou baixa turbidez.

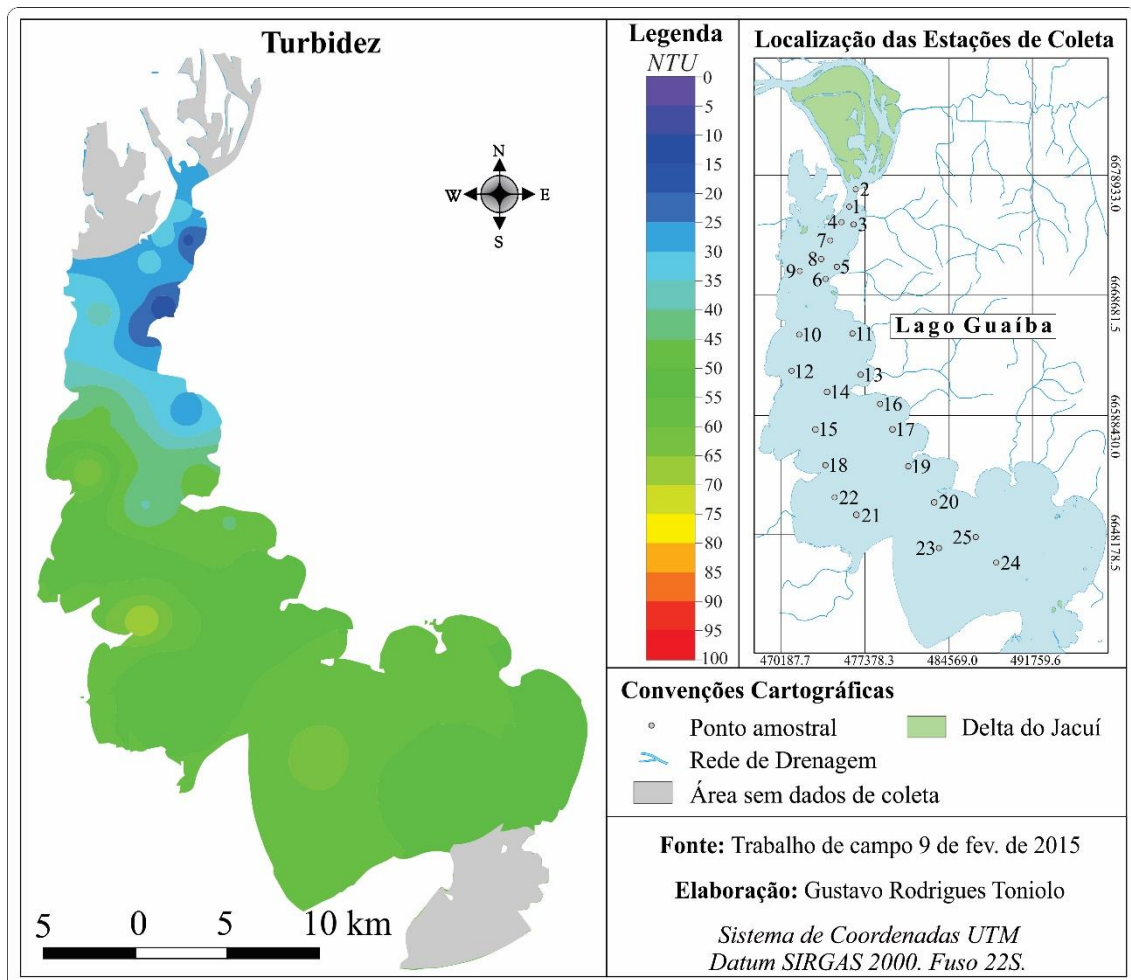


Figura 25 - Distribuição espacial da Turbidez (NTU), em 09 de fev. de 2015, Lago Guaíba.

### 4.3 Análise dos dados hiperespectrais

Os espectros de reflectância da água foram coletados a partir de 25 estações amostrais distribuídas no Guaíba no dia 09 de fevereiro de 2015. As coletas a nível de campo iniciaram aproximadamente as 10 da manhã e se estenderam até as 15 horas, sob condições de sol com nuvens em alguns pontos. Além disso, foram medidos ventos com direção predominantemente SE e velocidade média de 8km/h.

Os espectros adquiridos em campo consistem na média de 10 leituras com o espectrorradiômetro sobre o alvo. Sobre esses espectros aplicou-se o filtro de média simples com o objetivo de suavizar e amenizar a presença de ruídos. Na Figura 26 observa-se que a aplicação de um filtro de média simples em que se especificou uma janela de 7 pontos foi o suficiente para suavizar os espectros de forma a não comprometer feições espectrais que aparentemente seriam úteis para análise.

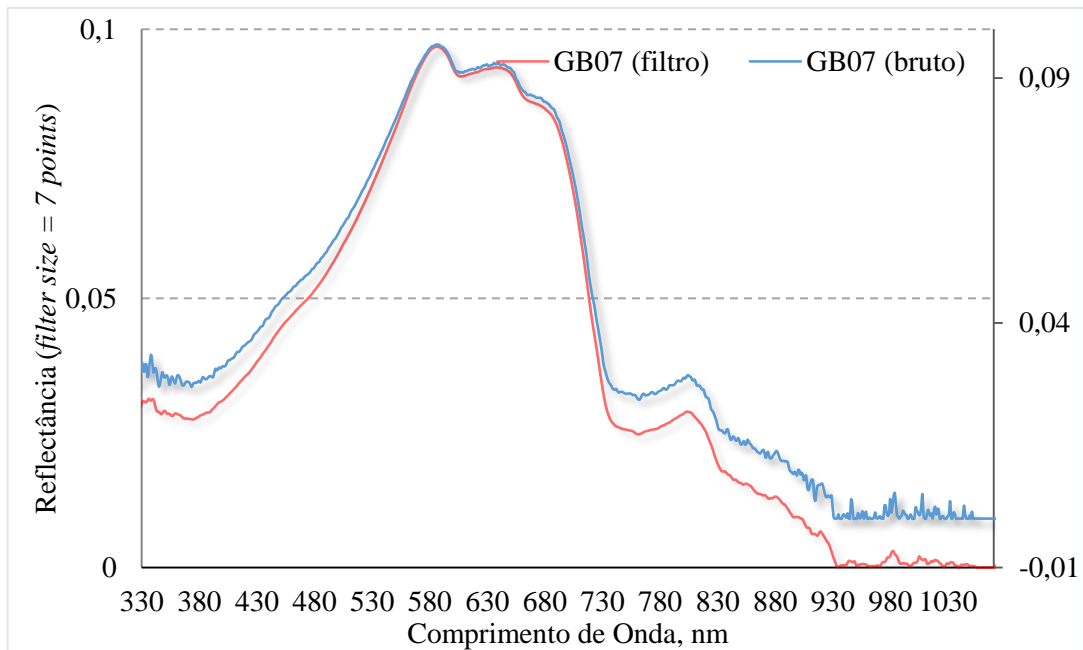


Figura 26 - Resultado da suavização no espectro da estação amostral GB07. Tamanho do filtro = 7 pontos.

A Figura 27 apresenta os espectros de reflectância (já suavizados) medidos em campo para todas as estações amostrais. Analisando os espectros, observa-se uma grande semelhança entre os espectros medidos tanto em termos das feições espectrais quanto em termos do albedo (reflectância média no intervalo apresentado, 400 a 900 nm, relativamente baixa, em torno de 0,14), e pode variar conforme as respectivas concentrações de COAs. Na Tabela 6 pode-se observar os valores obtidos em cada estação amostral de cada parâmetro limnológico, entre eles os principais constituintes opticamente ativos analisados: TSS e Chl-*a*.



| <i>ECs</i>  | <b>TUR</b> | <b>TSS (mg/L)</b> | <b>Chl-<i>a</i> (mg/L)</b> | <b>DS</b> | <b>Profundidade (m)</b> |
|-------------|------------|-------------------|----------------------------|-----------|-------------------------|
| <i>GB01</i> | 31,10      | 8,00              | 3,37                       | 60        | 12,19                   |
| <i>GB02</i> | 28,00      | 12,67             | 8,42                       | 71        | 5,49                    |
| <i>GB03</i> | 25,30      | 6,67              | 14,31                      | 75        | 1,52                    |
| <i>GB04</i> | 31,10      | 8,00              | 17,68                      | 70        | 5,18                    |
| <i>GB05</i> | 24,10      | 4,00              | 13,47                      | 78        | 6,10                    |
| <i>GB06</i> | 26,40      | 5,33              | 10,95                      | 70        | 6,71                    |
| <i>GB07</i> | 30,70      | 8,67              | 3,37                       | 68        | 2,44                    |
| <i>GB08</i> | 28,90      | 4,67              | 44,63                      | 68        | 1,22                    |
| <i>GB09</i> | 33,00      | 7,33              | 6,74                       | 60        | 1,22                    |
| <i>GB10</i> | 36,20      | 24,00             | 10,10                      | 60        | 4,88                    |
| <i>GB11</i> | 29,00      | 9,33              | 7,58                       | 60        | 2,13                    |
| <i>GB12</i> | 43,30      | 16,00             | 37,05                      | 40        | 2,74                    |
| <i>GB13</i> | 36,50      | 14,00             | 22,73                      | 52        | 3,05                    |
| <i>GB14</i> | 33,90      | 6,00              | 16,84                      | 62        | 3,66                    |
| <i>GB15</i> | 39,70      | 16,67             | 16,00                      | 48        | 0,91                    |
| <i>GB16</i> | 35,90      | 15,33             | 11,79                      | 50        | 2,74                    |
| <i>GB17</i> | 38,30      | 14,67             | 13,47                      | 45        | 3,05                    |
| <i>GB18</i> | 45,60      | 23,33             | 29,47                      | 43        | 1,52                    |
| <i>GB19</i> | 38,70      | 14,67             | 22,73                      | 45        | 4,88                    |
| <i>GB20</i> | 41,10      | 13,33             | 41,26                      | 48        | 8,23                    |
| <i>GB21</i> | 39,10      | 16,00             | 29,47                      | 50        | 1,83                    |
| <i>GB22</i> | 38,60      | 13,33             | 15,16                      | 56        | 2,44                    |
| <i>GB23</i> | 43,30      | 13,33             | 12,63                      | 50        | 4,27                    |
| <i>GB24</i> | 38,40      | 18,67             | 21,89                      | 50        | 5,49                    |
| <i>GB25</i> | 40,70      | 19,33             | 51,36                      | 45        | 3,66                    |

Tabela 6 - Dados coletados em campo no Lago Guaíba no dia 9 de fevereiro de 2015.

A baixa reflectância observada na faixa de comprimento de onda do azul em muitos casos é atribuída a presença de clorofila-*a*, matéria orgânica dissolvida e/ou húmus aquáticos que, dependendo da concentração são responsáveis por elevar o coeficiente de absorção em direção aos comprimentos de onda mais curtos, mas com efeitos pouco notáveis (GITELSON, 1992; DEKKER, 1993; KIRK, 2011; RUDORFF *et al.*, 2007).



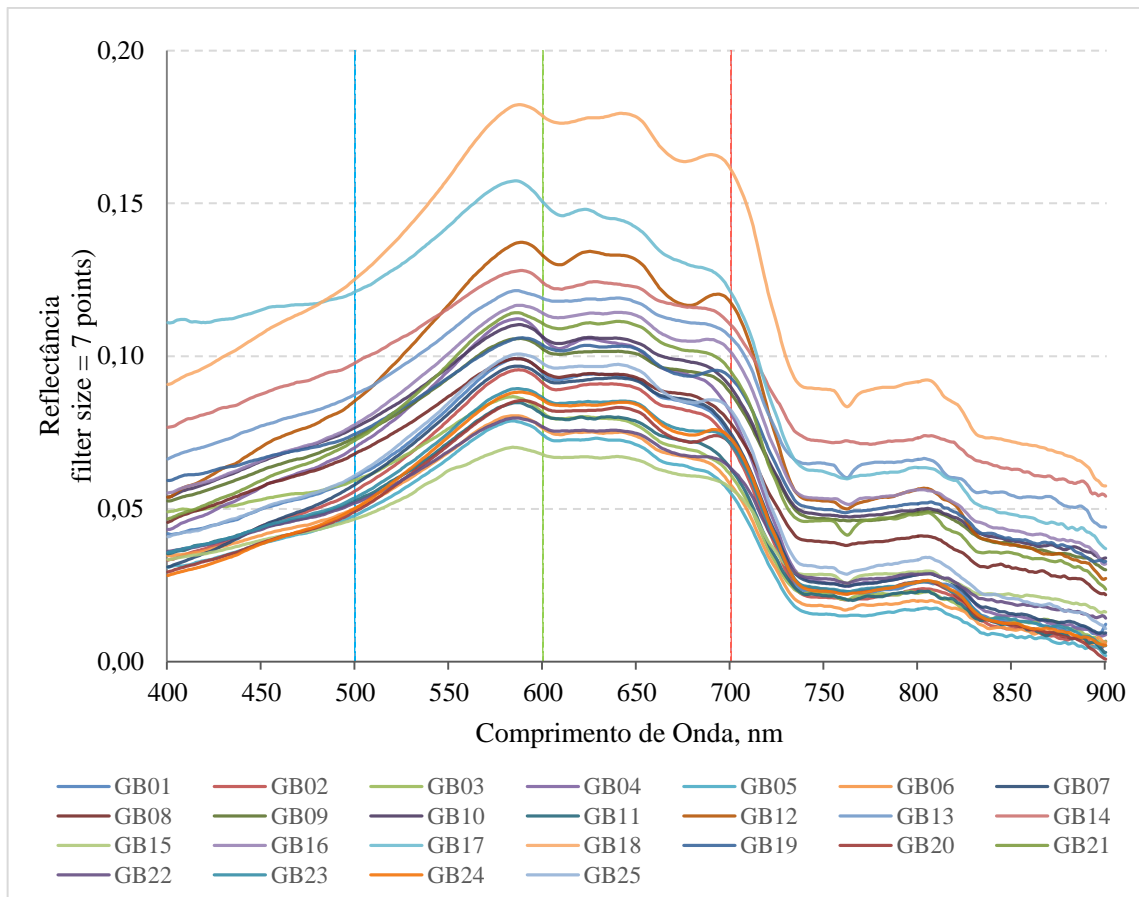


Figura 27 - Espectros de reflectância da água medidos pelo espectrorradiômetro *FieldSpec® HandHeld* nas 25 estações de coleta, campanha de campo em 09 de fevereiro de 2016, Lago Guaíba.

Observa-se também que o aumento da reflectância em toda a faixa espectral está relacionado quase que diretamente às diferentes concentrações de sólidos, principalmente a faixa de comprimento de onda do infravermelho de 700 a 850 nm. Desta maneira as maiores concentrações de sólido em suspensão ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) podem proporcionar maiores reflectâncias (CHEN *et al.*, 1992).

Outras características na reflectância espectral observadas foram: o pico na região do verde, em torno de 550 nm, causado pela menor absorção pela clorofila-*a*. Também atribuída à presença de clorofila-*a*, como foi já fora tratado no tópico 2.3.4, está o decréscimo na quantidade de radiação refletida nos comprimentos de onda do azul e também do vermelho (GITELSON, 1992; JENSEN, 2011).

Parte das ECs apresentaram espectros com algumas distinções em relação as demais. Pontos onde houve maiores concentrações de clorofila-*a* (por exemplo: GB25, GB20, GB12, GB18) apresentaram um declive, ou seja, uma diminuição acentuada na magnitude de

reflectância em 620 e 680 nm. Ambas as feições de absorção são descritas por Gitelson (1992) e Matthews *et al.* (2010) como associadas à absorção pela ficocianina e clorofila-*a*, respectivamente. Seguindo esta lógica as estações de coleta com concentrações abaixo da média de clorofila-*a* (GB1, GB2, GB7, GB9 e GB11) não apresentaram tais feições, principalmente em 689 nm.

Observa-se também que para as estações de coleta GB05, GB10, GB18 e GB24, em que se verificou maiores quantidades de sólidos em suspensão os picos de reflectância tenderam a se deslocar em direção a comprimentos de ondas um pouco maiores (587 e 588 nm) enquanto que para GB05, GB06, GB07 e GB08, em que se verificou menores quantidades de TSS os picos se concentraram em comprimentos de onda de 584 a 586 nm.

#### 4.4 Correlação com as variáveis limnológicas

A Figura 28 apresenta os correlogramas, nos quais o eixo Y expressa o coeficiente de correlação  $r$ , entre as variáveis limnológicas e cada um dos comprimentos de onda especificados (eixo X). O correlograma mostra a intensidade de associação existente entre essas duas variáveis quantitativas. O resultado do teste de hipótese sobre a correlação indicou que para um nível de significância  $\alpha = 0,05$  que os dados amostrais apoiam a existência de correlação para a amostra, sendo os valores significativos para  $r$  acima de 0,39. Para a variável Chl-*a* não se rejeitou a hipótese  $H_0$ , em que não há correlação entre essa variável quantitativa e a reflectância.

Entre os comprimentos de onda mais curtos (400 e 500 nm) a intensidade de correlação foi baixa entre todas as variáveis. Para a variável TSS as correlações mais altas foram encontradas entre os comprimentos de onda de 630 a 660 nm,  $r$  acima de 0,43 (ou  $r^2 = 0,18$ , ou seja, 18% da variação observada na reflectância é explicada pelas quantidades de TSS), e entre 685 a 730 nm,  $r$  máximo de 0,48 (ou  $r^2 = 0,23$ , ou seja, 23% da variação pode ser explicada). Embora o coeficiente de correlação seja significativo, há possibilidades de que as baixas concentrações de sólidos e clorofila não tenham sido suficientes para determinar feições típicas no espectro de reflectância, resultando em baixos coeficientes de correlação.

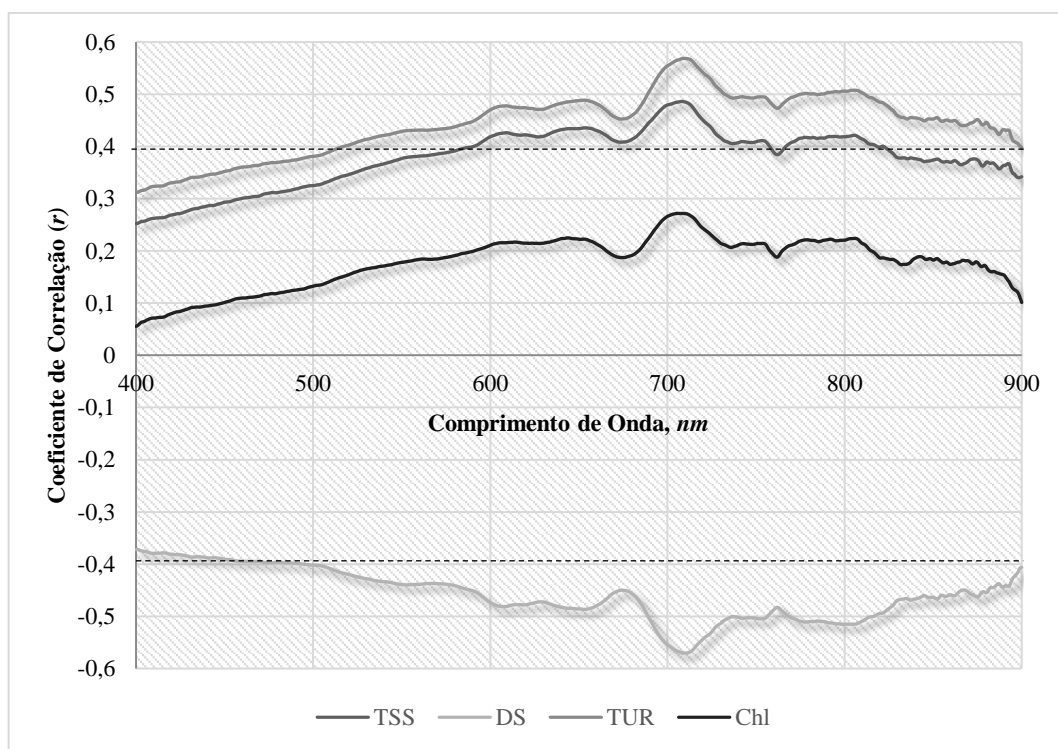


Figura 28 - Correlograma entre as variáveis limnológicas com valores de reflectância nos diferentes comprimentos de onda. A linha tracejada indica o limite dos valores estatisticamente significativos ( $\alpha = 0,05$ ).

Para a variável TUR as correlações mais altas também foram encontradas entre os comprimentos de 685 a 730 nm, com  $r$  máximo de 0,56 em 709 nm (31% da variação observada na reflectância é explicada pelas quantidades de TUR). Os dados de clorofila-*a* apresentaram fraca correlação com a reflectância em todos comprimentos de onda. O DS apresentou correlação negativa entre a reflectância da água em todos os comprimentos de onda. O maior valor de  $r$  foi de 0,57 ( $R^2 = 0,32$ ) em 709 nm (Figura 29).

A análise do correlograma permite constatar que o TSS é a variável que domina a resposta espectral da água do Lago. Os baixos valores de Chl-*a* determinam feições nos espectros de reflectância, conforme a literatura, entretanto os baixos valores observados em alguns pontos resultaram em correlações pouco significativas com os espectros de reflectância da água. Na Figura 29 são apresentados os diagramas de dispersão para as variáveis Clorofila-*a*, Totais de sólidos em Suspensão, Turbidez e Transparência, com os melhores ajustes para os comprimentos de onda observados nos espectros.

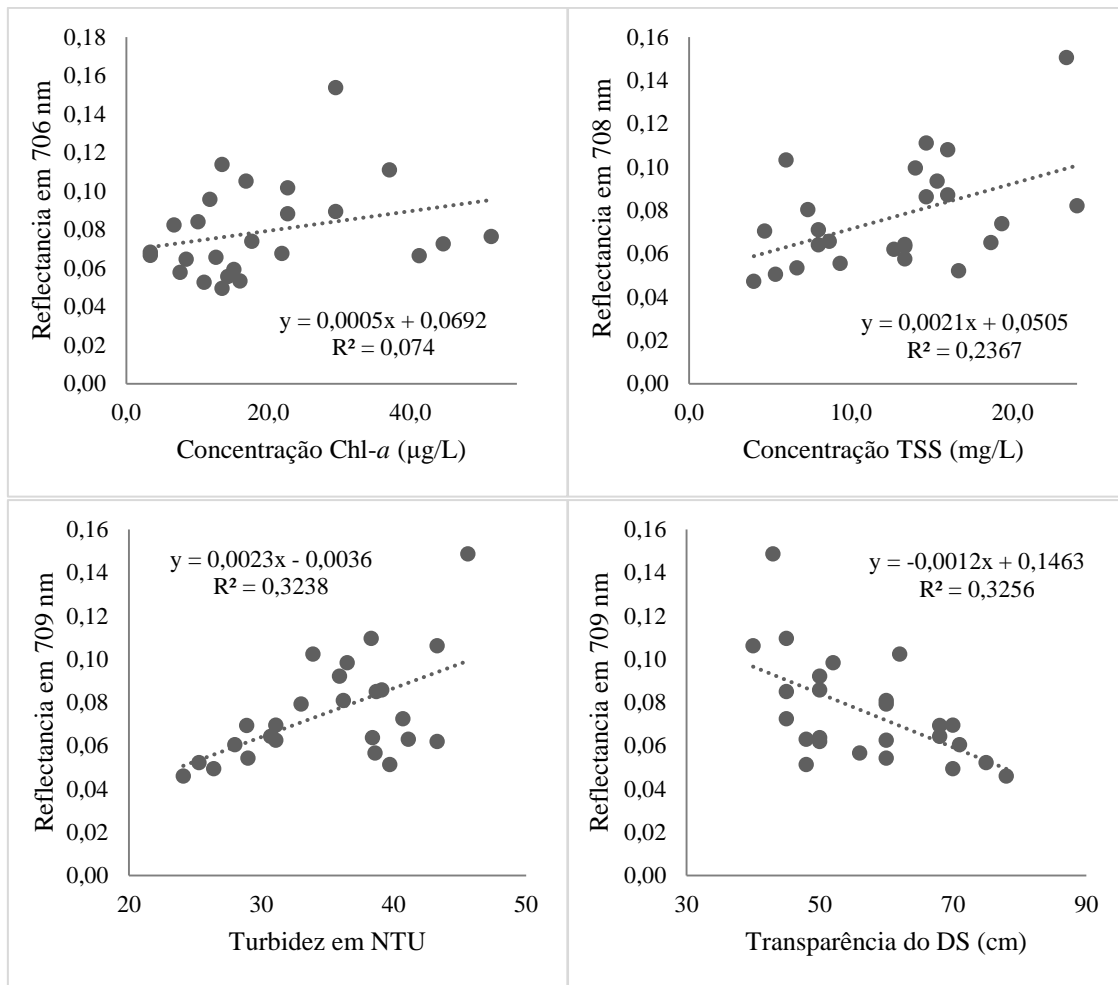


Figura 29 - Diagramas de dispersão entre as variáveis limnológicas Chl-*a*, TSS, TUR e DS e reflectância em 706, 708 e 709 nm, respectivamente.

#### 4.5 Análise Derivativa

A Figura 30 apresenta as curvas de derivada de primeira e segunda ordem calculadas a partir dos 25 espectros de reflectância em relação ao comprimento de onda. Como pode se observar com a primeira derivada, determinadas feições espectrais aparentemente não notadas nas curvas de reflectância ficam realçadas e as constantes aditivas de radiação são minimizados (CHEN *et al.*, 1992; GOODIN *et al.*, 1993).

Com relação a dados hiperespectrais Rudorff (2006) destaca que são muito sensíveis às componentes que causam variações na radiação detectada pelo sensor. A aplicação da derivada tem como vantagem minimizar os efeitos causados por tais componentes e destacar as feições

de absorção ou espalhamento que estão ligadas principalmente a presença em baixa concentração dos COAs.

Embora os espectros originais difiram em magnitude, no intervalo de 400 a 900 nm (Figura 30) eles têm valores muito próximos na primeira e segunda derivada, mesmo que em alguns intervalos de comprimento de onda ainda se possa visualizar diferenças na magnitude dos valores. Observa-se também que as mudanças, até as mais sutis, na curvatura que são consistentes ao longo de todo intervalo, aparecem nos espectros derivados, tanto como mudanças positivas como negativas. As mesmas observações também foram feitas por Tsai e Philpot (1998).

Pela forma das curvas espectrais pode-se afirmar indícios da presença de clorofila-*a*, principalmente nas amostras que apresentam a feição de absorção na região 3 (Figura 30) mais acentuada. Como explicado por Rudorff *et al.*, (2005), a presença de clorofila-*a* não é somente evidenciada pelas feições de absorção como também pela menor diferença entre os valores de reflectância integrada entre 600-700nm e 750-800 nm, ou seja, maior proximidade entre o vermelho (absorvido pelos pigmentos) e o infravermelho (espalhado pela estrutura celular). A baixa concentração de chl-*a* fez com que a diferença de reflectância entre as regiões do vermelho e do infravermelho fosse maior. Nas amostras GB01, 02, 04, 07, e principalmente em GB08 e GB25 isto é evidenciado.

A primeira derivada espectral apresentou formas relativamente similares (Figura 30.b), variando pouco entre 400 a 500 nm. Conforme aumenta o comprimento de onda nota-se que os picos de absorção e reflectância nas curvas de derivada correspondem às feições de maiores inclinações nos espectros de reflectância, evidenciando, desta forma, os pontos onde se encontram as mudanças bruscas de resposta espectral. A partir de 500 até aproximadamente 590 nm, verificou-se uma mudança associada ao pico de reflectância no verde, tais resultados assemelham-se aos encontrados por Corazza (2010) no reservatório Dona Francisca, no Rio Grande do Sul.

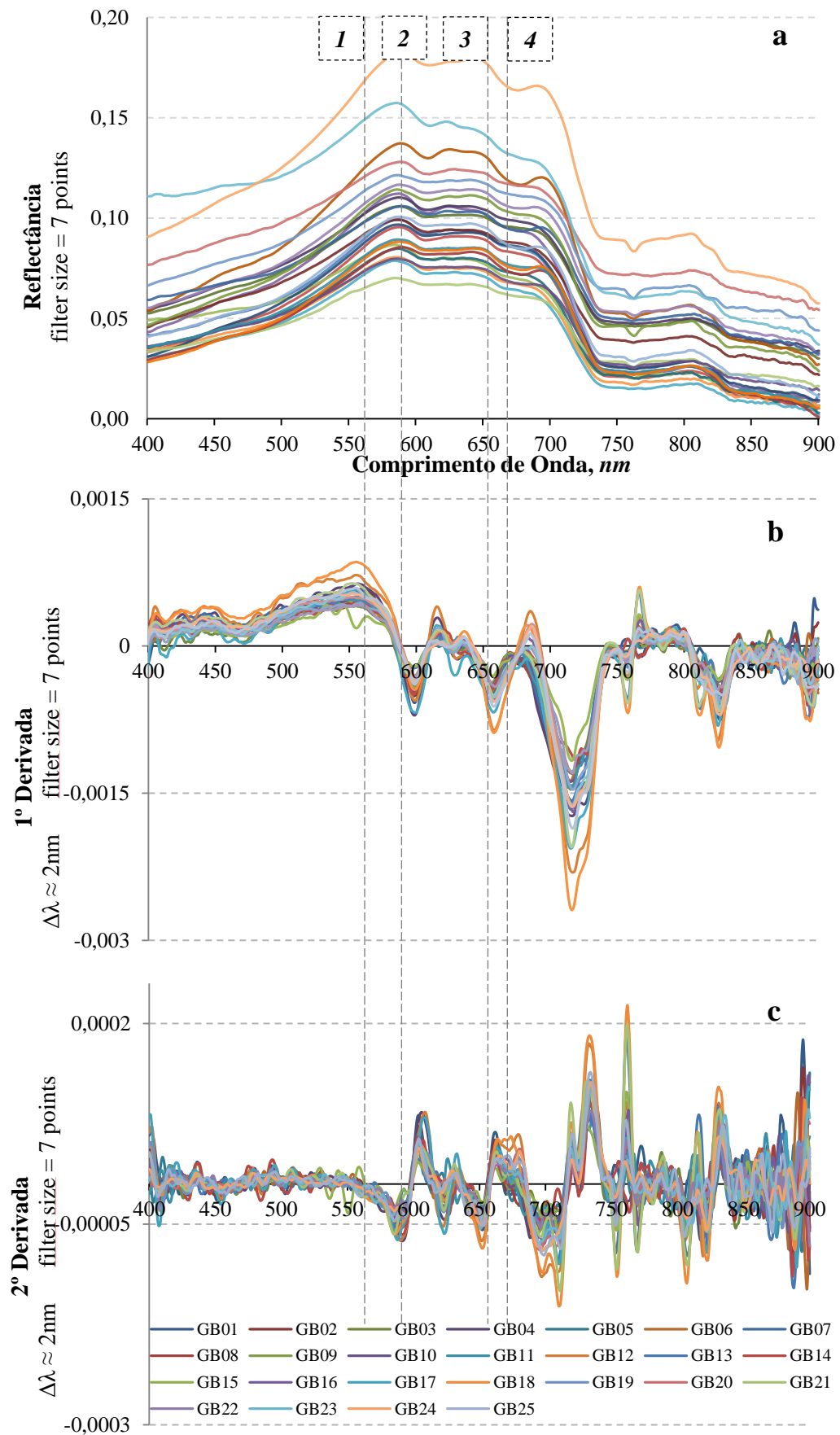


Figura 30 - a) espectro de reflectância; b) primeira derivada dos dados de reflectância e c) segunda derivada.

Na primeira derivada alguns picos de maiores reflectância (Figura 30.a) passam a cruzar o eixo das abscissas, por exemplo, o pico em 589 nm (1), de maior reflectância no verde. Verifica-se que as curvas obtidas para o Lago, mantêm um padrão semelhante das curvas de primeira derivada obtidas por Santos (2012) no reservatório Passo Real. As curvas de primeira derivada também mostram um padrão de pico-vale bem definidos na região entre 670 e 750 nm, padrão semelhante ao relatado por Goodin *et al.* (1993).

Para a segunda derivada, resultados encontrados por Goodin *et al.* (1993) mostram que a mesma remove efeitos de sólidos em suspensão na água. Além disso, mostra valores de derivada muito baixos e sem padrão ordenado ou estrutura que possa ser atribuída às condições na água. Analisando a derivada de segunda ordem, verifica-se também um padrão de pico e vale, entretanto, os valores de mínimo e máximo ocorrem em regiões ligeiramente diferentes (ver Figura 30c).

A feição de absorção nos espectros de reflectância em 615 nm (2), que está associada à absorção pela ficocianina (DEKKER, 1993), passou a cruzar o eixo das abscissas e na segunda derivada essa feição passou a ficar mais destacada. Já em (3) (Figura 30) tem-se a feição de absorção no vermelho ligada à absorção pela clorofila-*a*, em aproximadamente 676 nm.

A Figura 31 apresenta o correlograma entre a primeira derivada e as variáveis de Totais de Sólidos em Suspensão, Transparência, Turbidez e Clorofila-*a* obtidos na coleta de fevereiro de 2015. As linhas de correlação de TSS e TUR se assemelharam muito, apesar de que a TUR apresentou maiores valores de correlação positiva entre as faixas de 675 a 700 nm ( $r = 0,79$ ) e negativa em 670 nm ( $r = -0,78$ ).

As faixas que apresentaram maiores correlações com a primeira derivada foram: 584 nm ( $r = 0,60$ ) com TSS e TUR e DS; 653-674 nm ( $r = 0,81$ ) com DS; 655-674 e 675-700 nm

com TSS, TUR e Chl-*a*; 710-733 nm com TUR e TSS; e 870 nm ( $r = -0,69$ ) com Chl-*a*. Sendo os valores significativos para  $r$  acima de 0,39, de um nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

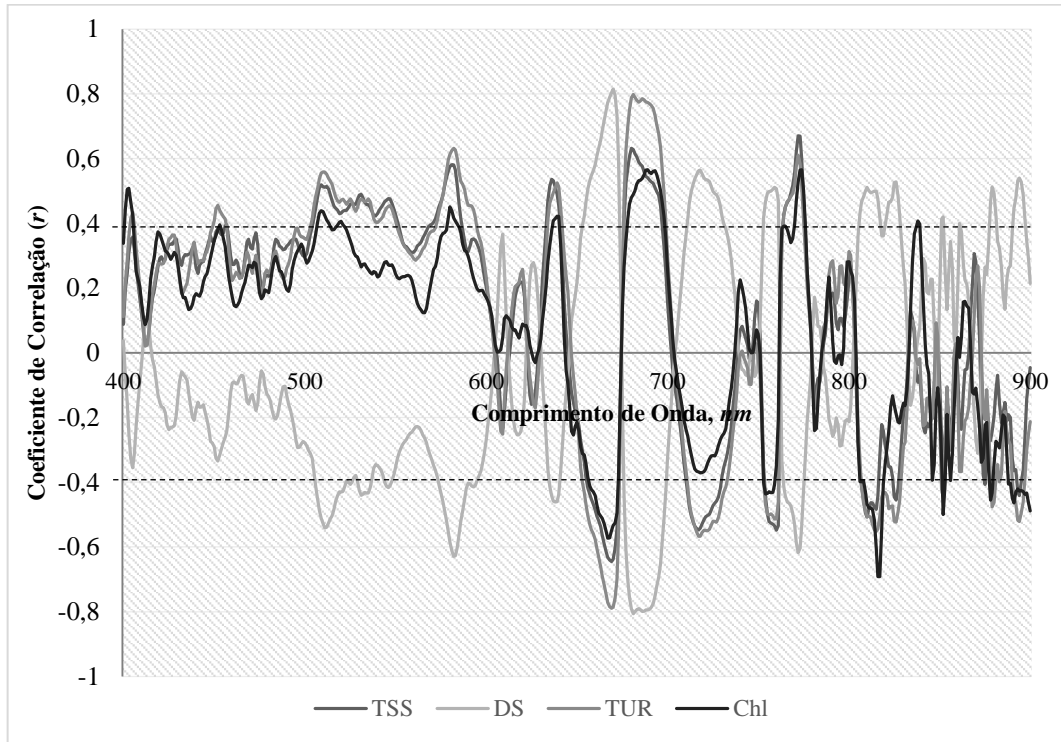


Figura 31 – Correlação das variáveis limnológicas com primeira derivada nos diferentes comprimentos de onda.

Na Figura 32 são apresentados os diagramas de dispersão e melhores ajustes das variáveis DS e TUR com a primeira derivada no comprimento de onda de 670 nm.

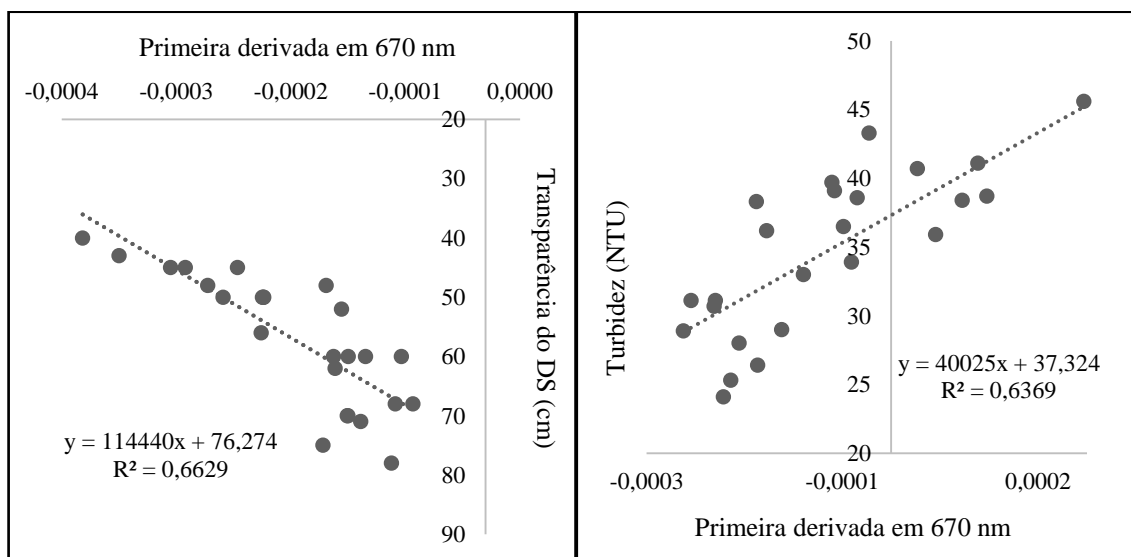


Figura 32 - Diagrama de dispersão entre as variáveis transparência (cm) e turbidez (NTU) e a primeira derivada em 670 nm.



Para a variável TSS a maioria dos picos positivos e negativos observados ficaram dentro do limite estatisticamente significativo para a primeira derivada, ou seja,  $r$  superiores a 0,39. Os maiores valores de  $r$  para totais de sólidos em suspensão ocorreram a 680 nm (-0,63), 669nm (-0,64) e 772 nm (0,66), ou seja, no intervalo de comprimento de onda do vermelho e infravermelho próximo. Desta maneira, pode-se verificar que as maiores diferenças entre o vermelho e infravermelho próximo são melhores explicadas pela presença de sedimentos em suspensão e Turbidez.

A Figura 33 apresenta os correlogramas entre as curvas de primeira e segunda derivada e TSS. Observa-se a existência de grandes oscilações nas curvas, principalmente na segunda derivada, havendo poucos valores significativos em até 600 nm. Apesar disso, nesta faixa há vários picos que resultaram em valores e correlação  $r$  acima de 0,39, tanto negativos como positivos. No correlograma de segunda derivada, o pico de correlação significativo foi em 674 nm (0,68) e em 713 e 714 nm com  $r$  acima de -0,69.

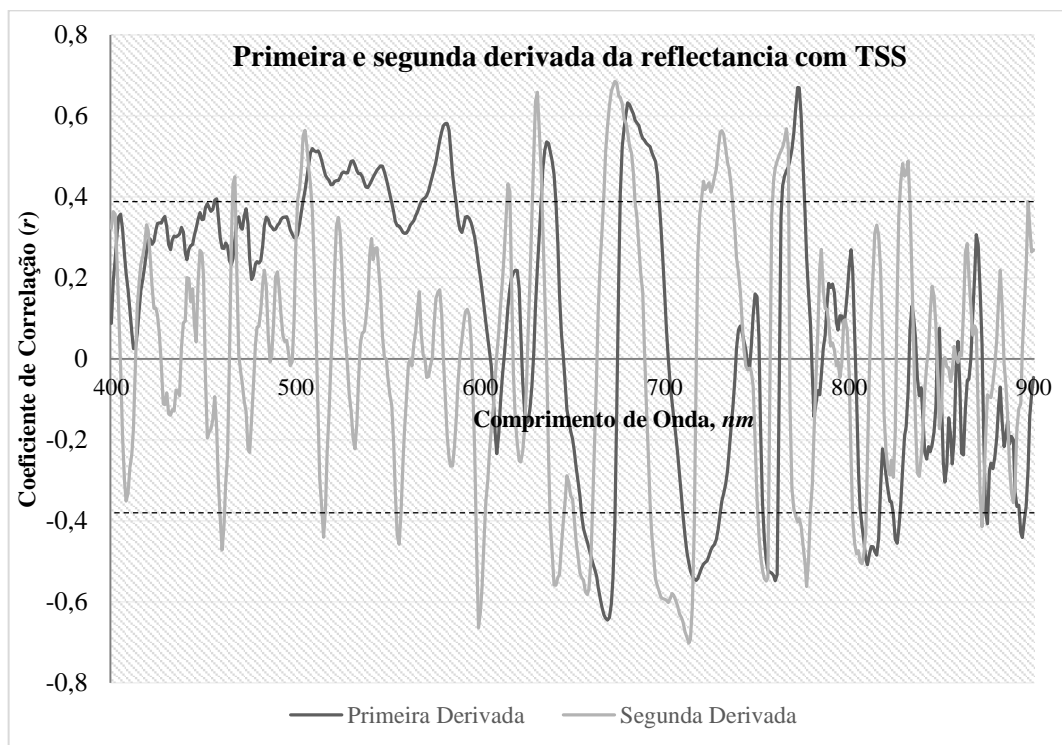


Figura 33 - Correlograma entre totais de sólidos em suspensão e curvas de primeira e segunda derivada espectral.

Os picos significativos relativos ao correlograma de segunda derivada podem estar relacionados com alguma feição de absorção que ocorre na curva original e que também apresenta alterações com a variação de sólidos em suspensão, como sugere Ennes (2008).

Entretanto Goodin *et al.* (1993) afirmam de que uma segunda derivação das curvas de turbidez remove os efeitos de sólidos em suspensão.

Na Figura 34 apresenta o diagrama de dispersão e o melhor ajuste para variável TSS com a primeira derivada no comprimento de onda de 772 nm.

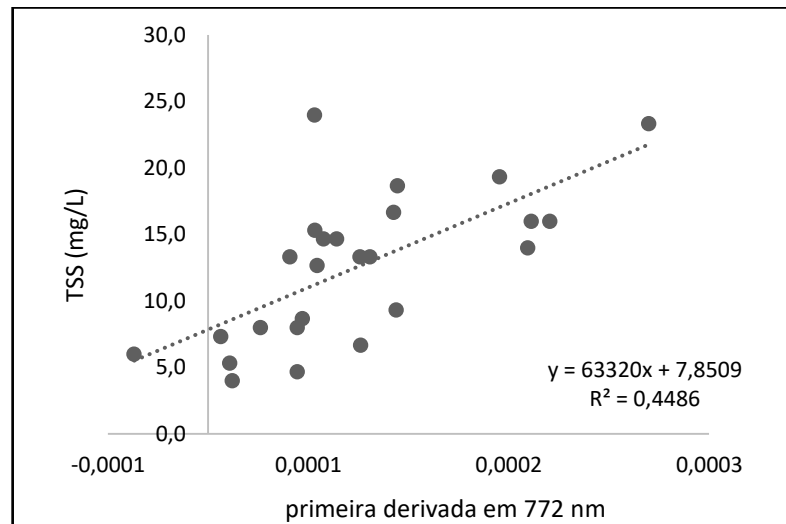


Figura 34 - Diagrama de dispersão entre a variável TSS e a primeira derivada em 772 nm

No correlograma de primeira derivada com a Chl-*a* (Figura 35), pode-se verificar que os maiores valores de correlação se encontram nas faixas de comprimentos de onda de 679 – 700 nm, entre o vermelho e o infravermelho. Nesta faixa o maior valor de  $r$  ocorreu em 690 nm (0,56), embora muitos comprimentos de onda também apresentaram um grau de correlação regular. Alta correlação neste comprimento de onda também foi encontrada por Rundquist *et al* (1996). Em aproximadamente 680 nm tanto para a primeira como para segunda derivada

também houve picos de correlação positivos e negativos, que podem estar relacionados com a presença de clorofila (WEAVER E WRIGLEY, 1994)

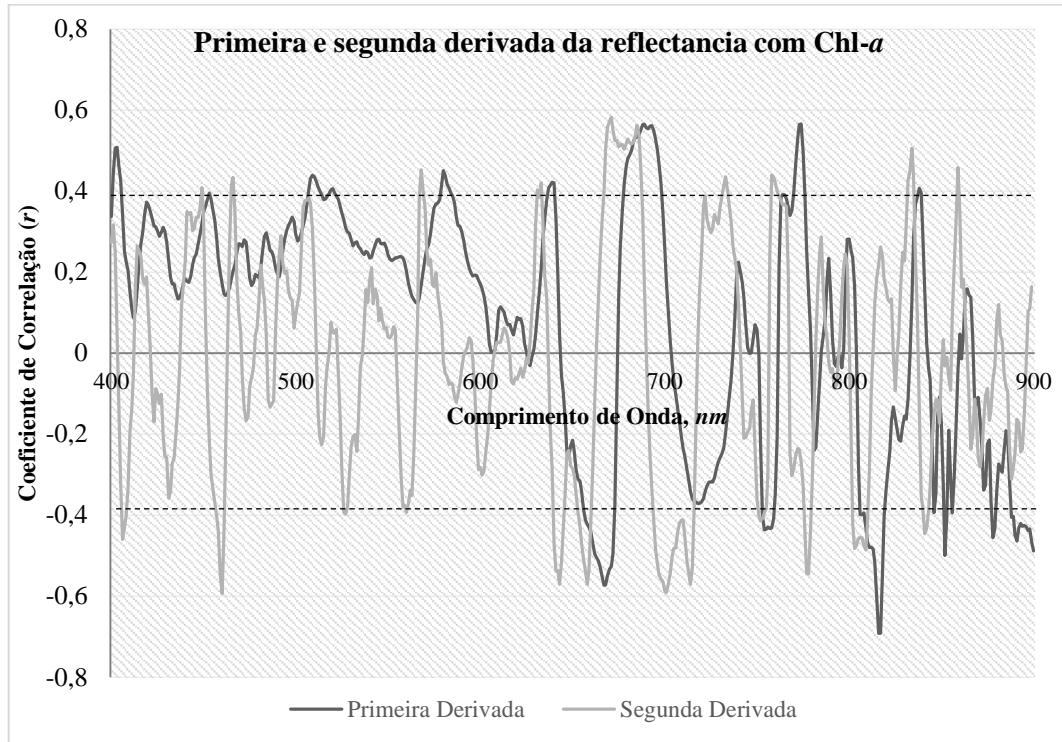


Figura 35 - Correlograma de concentração de clorofila-*a* com a primeira e segunda derivada do espectro de reflectância.

Nos dados de segunda derivada os comprimentos de onda que obtiveram correlações com grau regular com a concentração de clorofila foram 460 nm ( $r = -0,59$ ), 670 nm ( $r = 0,58$ ) e 701 nm ( $r = -0,59$ ). Rundquist *et al.* (1996) também encontraram correlações com comprimentos de onda próximos a 480 nm, entretanto, para a primeira derivada espectral. O comprimento de onda 670 nm ligado à absorção no vermelho pela clorofila-*a*, não ficou bem evidenciado nas curvas de primeira derivada, conforme Goodin *et al.* (1993), que observaram em suas curvas de derivada de primeira ordem um pico positivo neste comprimento de onda. Neste trabalho a diferenciação realizada pela segunda derivada obteve melhores coeficientes de correlação com este comprimento de onda e a concentração de clorofila-*a* (Figura 36).

Também foi gerado, a partir dos coeficientes de correlação calculados, o gráfico de dispersão (Figura 36) para o comprimento de onda de 690 nm ligado a fluorescência pela presença de clorofila-*a* na água. Neste comprimento de onda 38% da reflectância derivada pode ser explicada pela concentração de clorofila-*a* em um ajuste exponencial.

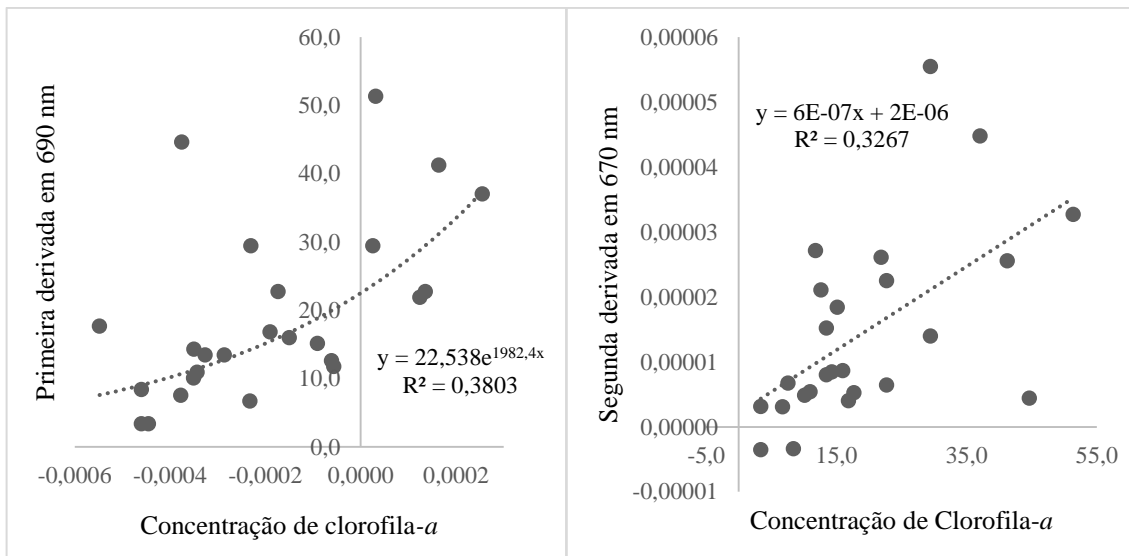


Figura 36 - Diagramas de dispersão entre a variável clorofila-*a* e a primeira derivada em 690 nm e clorofila-*a* e segunda derivada em 670 nm.

#### 4.6 Remoção do Contínuo

A técnica de remoção do contínuo proposta por Clark e Rough (1984) consiste em remover as feições contínuas dos espectros, normalizando-os segundo uma referência comum. Visa destacar bandas particulares de absorção nos espectros de reflectância, e assim, auxiliar na análise espectral. Aplicada ao intervalo de 400 a 900 nm ela realçou as diferenças nas principais bandas de absorção observadas nos espectros, principalmente aquelas associadas a presença de constituintes opticamente ativos na água (Figura 37).

A presença de feições típicas da presença de pigmentos que absorvem radiação nestes comprimentos de onda pode ser observada na Figura 37. Por exemplo, em 480 nm é o comprimento de onda de absorção pelo *B*-caroteno. Ressalta-se ainda, que nesta faixa espectral de comprimentos de onda mais curtos a matéria orgânica dissolvida exerce muita influência (DEKKER, 1993).

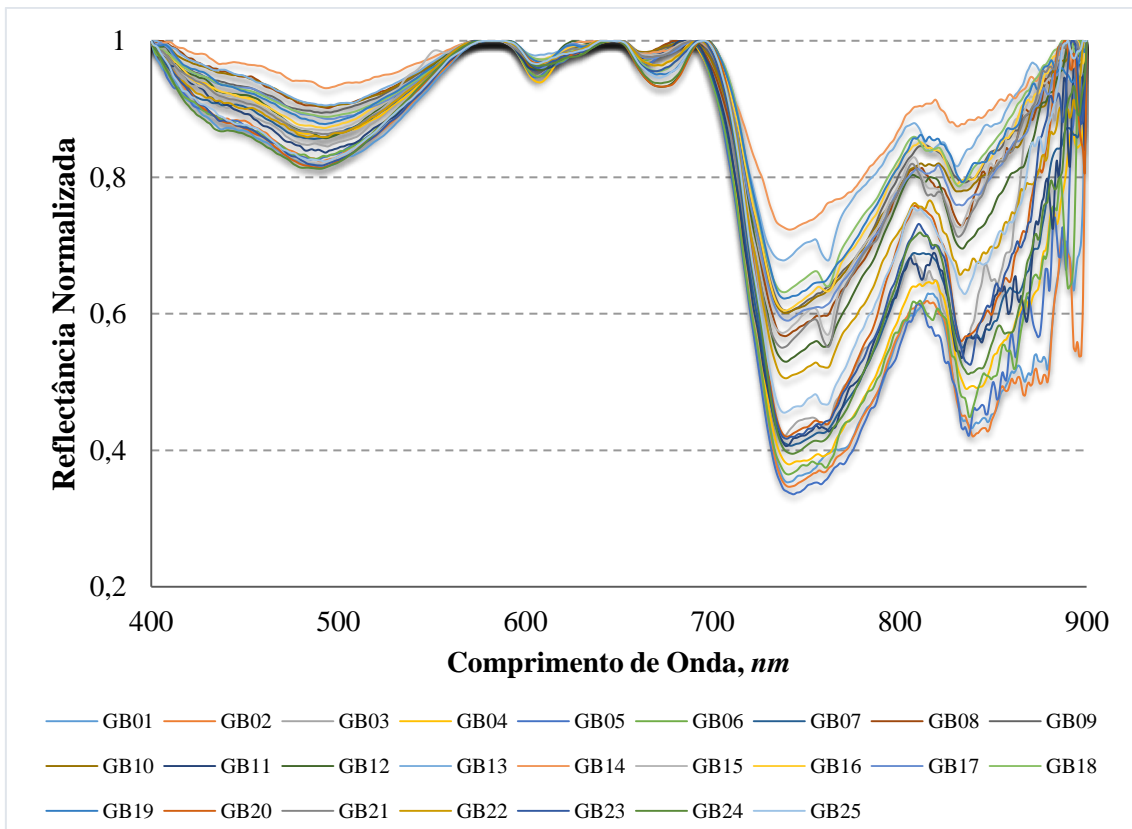


Figura 37 - Espectros do contínuo removidos para o intervalo de comprimento de onda de 400 a 900 nm.

Entre as faixas de 588 e 621 nm observa-se os máximos de absorção da ficocianina (KIRK, 2011; DEKKER, 1993). A banda de Absorção C entre 648 e 690 está relacionada com a presença de clorofila-*a* (KIRK, 2011). A Tabela 7 apresenta os limites das bandas de absorção escolhidos de forma a ressaltar as feições de absorção.

Os intervalos espectrais selecionados para posterior análise das bandas de absorção, podem ser visualizados na Tabela 7. Com os limites das bandas de absorção calculou-se a profundidade em cada intervalo espectral.

Tabela 7 - Bandas de absorção e seus respectivos comprimento de onda central.

| <i>Banda de Absorção</i> | <i>Limites inferior e superior <math>\lambda</math> (nm)</i> | <i>Central <math>\lambda</math> (nm)</i> |
|--------------------------|--|--|
| <i>A</i>                 | 400 – 580  | 492                                      |
| <i>B</i>                 | 588 – 621  | 605                                      |
| <i>C</i>                 | 648 – 690  | 666                                      |
| <i>D</i>                 | 690 – 750  | 734                                      |

Ao analisar as bandas de comprimento de onda mais curtos como de 400 a 500nm, pode-se observar a presença de ruídos (banda de absorção A), também observados por Breunig *et al.* (2007), associados principalmente à precisão das medidas radiométricas e à influência da atmosfera. Observa-se também que os espectros de absorção apresentam bastante variação quanto a magnitude da reflectância normalizada. Em termos de forma os espectros apresentaram bastante semelhança entre si, exceto no que se refere aos parâmetros quantitativos (profundidade e largura, por exemplo).

Na Figura 38 observa-se as profundidades das bandas para todos as estações amostrais, nas diferentes bandas de absorção analisadas. As maiores profundidades podem ser encontradas na faixa de comprimentos de onda mais longos, referentes a banda de absorção D. As menores profundidades foram observadas nas bandas B e C, sendo que nesta última houve grande variação no valores de profundidade para as diferentes estações amostrais.

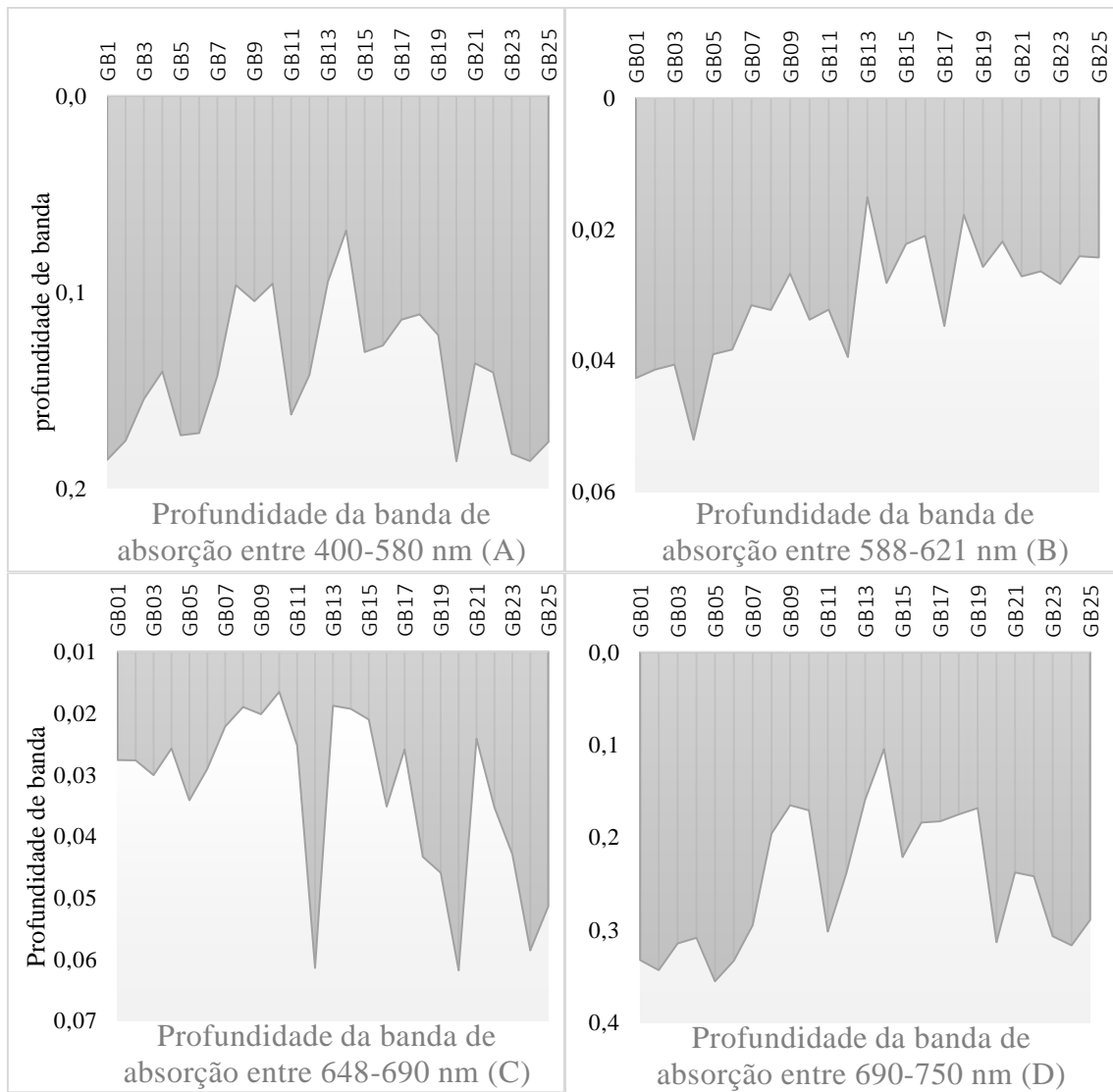


Figura 38 - Profundidade de banda de absorção para as diferentes estações amostrais.

A Figura 39 apresenta a correlação entre os valores de reflectância normalizada pelo contínuo, faixa de 400 a 900 nm, com as variáveis limnológicas coletadas em campo de Clorofila-a, Totais de sólidos em suspensão, transparência e turbidez. Para a primeira banda de absorção analisada (A), foram encontradas poucas correlações significativas entre a reflectância normalizada e variáveis limnológicas.

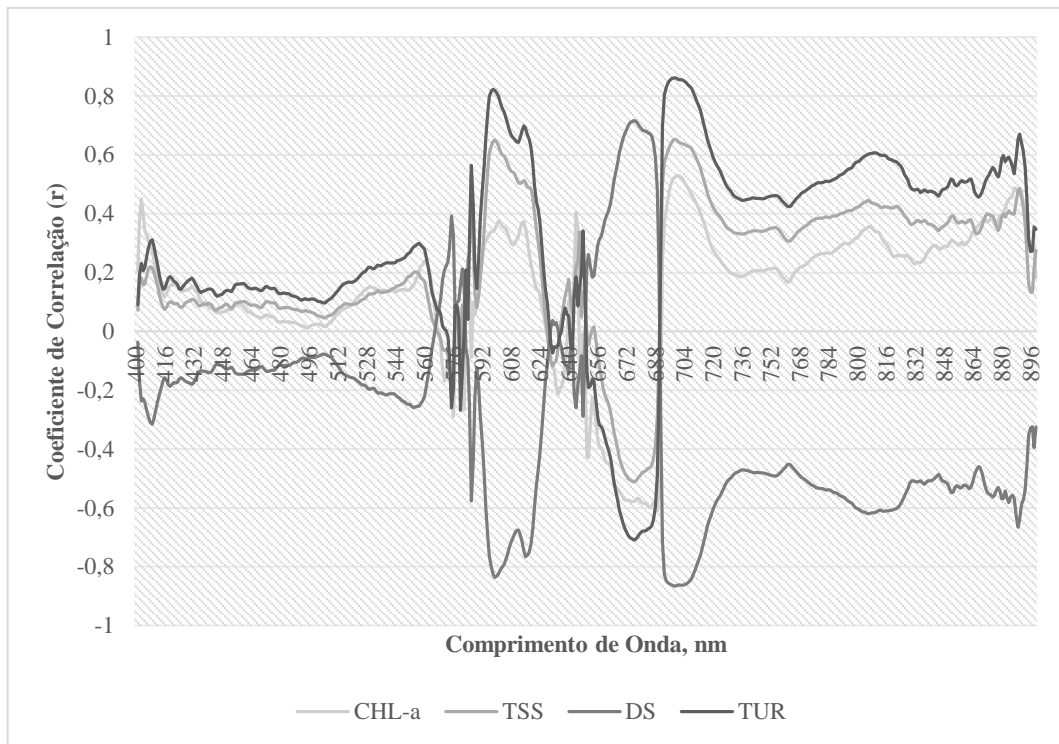


Figura 39 – Correlograma da remoção do contínuo para os diferentes comprimentos de onda com as variáveis limnológicas.

Já na segunda banda utilizada (B) foram encontrados graus de correlação forte entre as variáveis, tanto negativo como positivo, principalmente para as variáveis de turbidez e transparência ( $r = 0,81$  e  $-0,83$ , respectivamente) em 598 a 600 nm. Essas variáveis também apresentaram bom grau de associação na faixa da banda D, com correlação máxima no comprimento de onda de 699 nm ( $r = 0,86$ ).

A melhor correlação com a variável clorofila foi encontrada na banda de absorção C, com pico em 689 nm ( $r = -0,60$ ). A clorofila também apresentou boa correlação com a profundidade de banda C (Figura 38(C)), com um coeficiente de determinação de 0,27. A Figura 40 é apresenta os diagramas de dispersão com o melhor ajuste para a variável Chl-*a* com a reflectância normalizada em 689 nm e com o dado de profundidade de banda C, entre 648 – 690 nm.



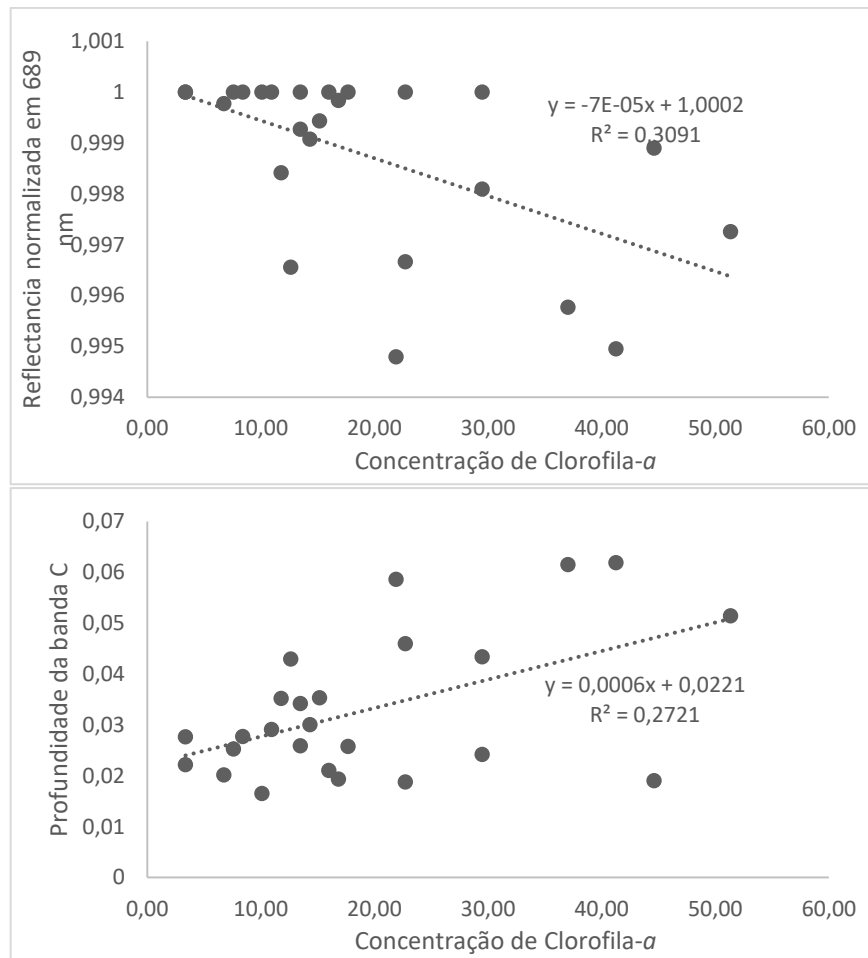


Figura 40 – Diagramas de dispersão entre a concentração de clorofila-*a* e a reflectância normalizada em 689 nm e profundidade de banda na faixa de 648 – 690 nm para todas estações amostrais.

#### 4.7 Regressões empíricas para inferência de variáveis limnológicas por meio da imagem do sensor LISS-III/ResourceSat-2

As bandas do sensor LISS-III/ResourceSat-2 do dia 8 de fevereiro de 2015 (um dia anterior ao dia de coleta de campo) cujos valores de reflectância apresentaram os melhores resultados de correlação com os dados de campo, foram utilizadas para estimar a distribuição espacial da turbidez (TUR) e da transparência no Lago Guaíba. O diagrama de dispersão entre os dados de reflectância na banda 3 do sensor LISS-III e de turbidez coletados em campo e a equação linear para estimativa da turbidez (modelo empírico) estão representados na Figura 41. A análise resultou em um Coeficiente de Determinação  $R^2 = 0,714$  e coeficiente de correlação  $r = 0,844$ . O coeficiente de correlação obtido foi testado via teste *t* de Student para  $\alpha=0,05$  e  $n = 25 - 2$  graus de liberdade.

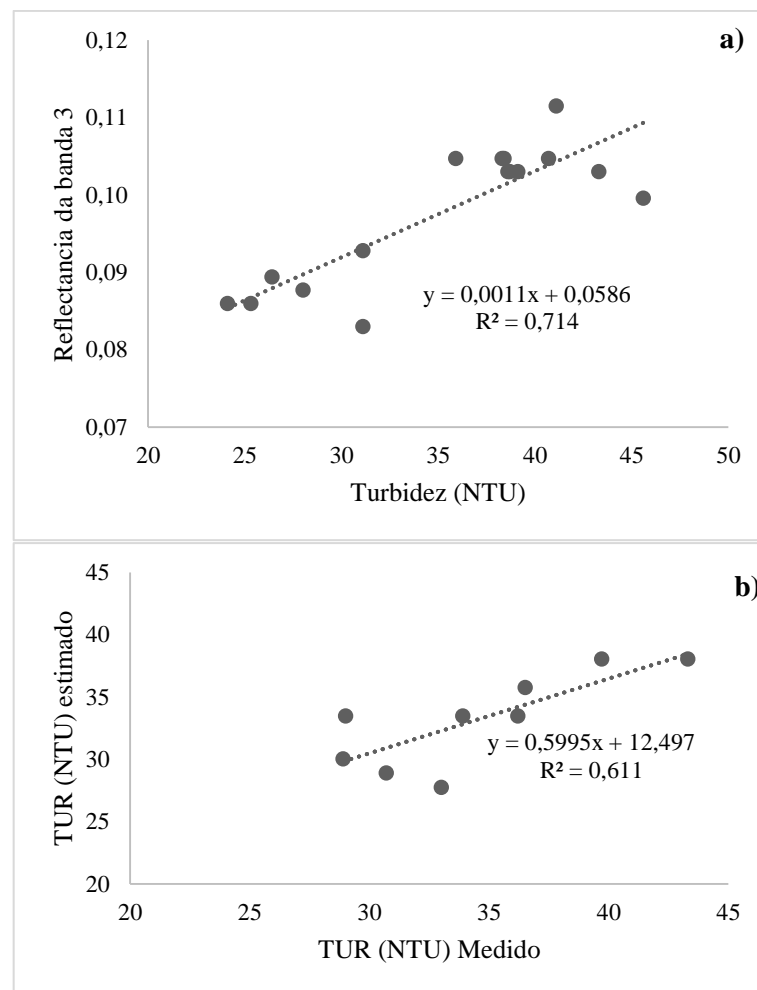


Figura 41 – (a) Modelo linear empírico para estimativa da turbidez no Lago Guaíba para 8 de fev. de 2015. e (b) teste de validação do modelo.

Para a transparência do Disco de Secchi a banda 2 do sensor LISS-III apresentou boas correlações com a reflectância. O diagrama de dispersão entre os dados de reflectância na banda 2 e os de transparência está representada na Figura 42, onde também está exposta a equação linear para estimativa da transparência. A análise resultou em um Coeficiente de Determinação  $R^2 = 0,717$  e coeficiente de correlação  $r = 0,847$ .

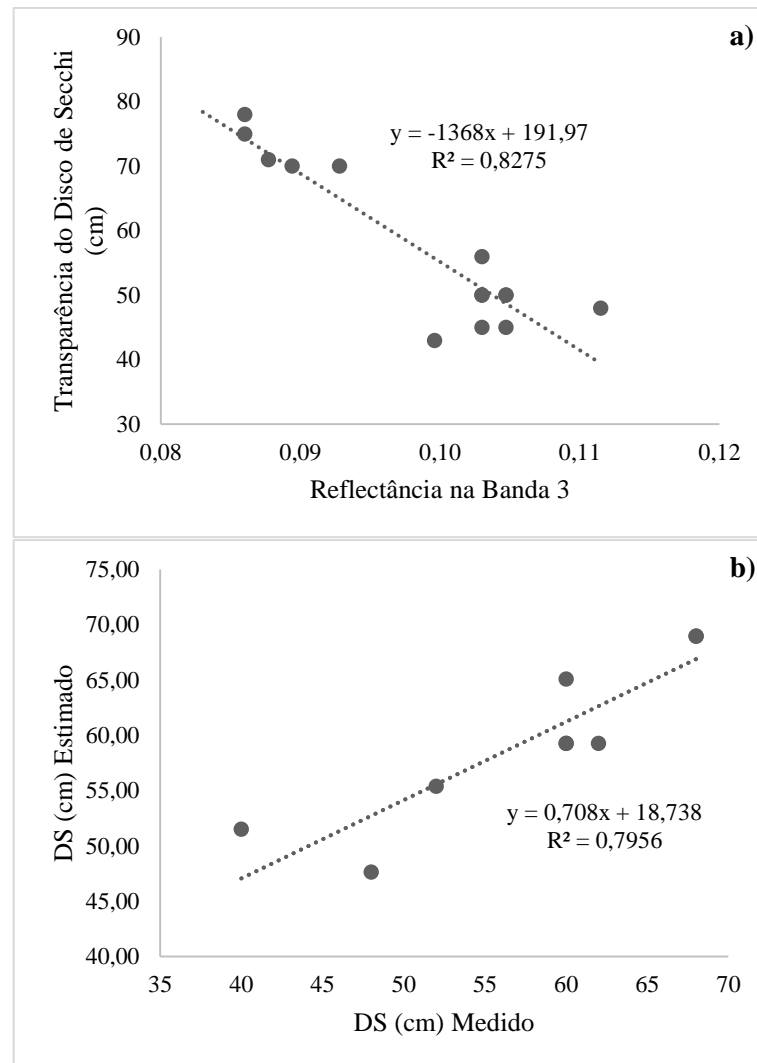


Figura 42 -(a) Modelo linear empírico para estimativa da transparência no Lago Guaíba para 8 de fev. de 2015. e (b) teste de validação do modelo.

A partir da validação, os modelos expostos nas Figura 41 e 42 foram aplicados sobre a imagem da banda 3 do Sensor LISS-III do dia 8 de fevereiro de 2015 buscando analisar a distribuição espacial das variáveis limnológicas estimadas.

Os resultados obtido da aplicação dos modelos empíricos para estimar a turbidez e transparência na água do Lago Guaíba estão expostos nas Figuras 43 e 44. A classificação da distribuição espacial dos valores de turbidez evidenciou diferentes compartimentos aquáticos que estão relacionados aos diferentes valores de reflectância na água. Destaca-se que as maiores

reflectâncias na região do vermelho estão associadas à presença de maiores valores de turbidez, o que por sua vez pode estar ligado ao volume de material orgânico e inorgânico na água.

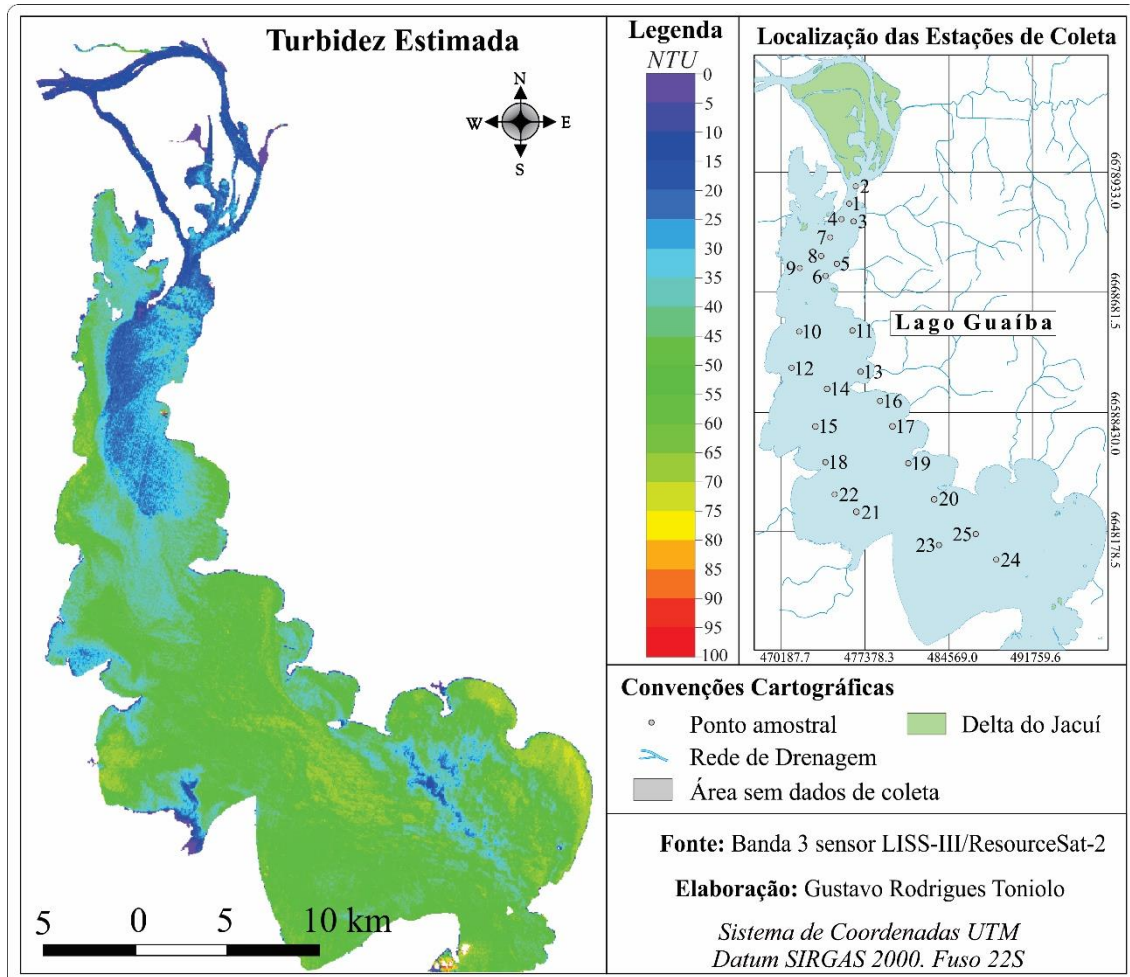


Figura 43 - Estimativa de Turbidez, banda 3 do sensor LISS-III, 8 de fevereiro de 2015, Lago Guaíba.

Os menores valores de turbidez foram encontrados na área associada ao deságue da bacia do Guaíba, logo após o delta do Jacuí, valores entre 28 e 30 NTU. Já os maiores valores se encontram no setor central e sul do Lago, entre 44 e 50 NTU.

Sendo a turbidez a medida da dificuldade de um feixe de luz atravessar certa quantidade de água, a transparência está estritamente relacionada com a mesma. Desta forma, o modelo de estimativa da transparência também resultou em bom desempenho (Figura 44). A classificação da distribuição espacial dos valores de transparência evidenciou diferentes compartimentos aquáticos no Lago Guaíba que podem estar ligados aos estados tróficos Eutrófico e

Supereutrófico, ou seja, com um elevado enriquecimento por nutrientes provindos de variadas fontes.

A baixa transparência da água é acompanhada pelo aumento da concentração de sólidos em suspensão, observa-se que em setores do lago onde ocorrem as menores velocidades de escoamento, e onde há precipitação do material particulado em suspensão, tem-se menor disponibilidade de luz, refletindo em valores baixos de transparência.

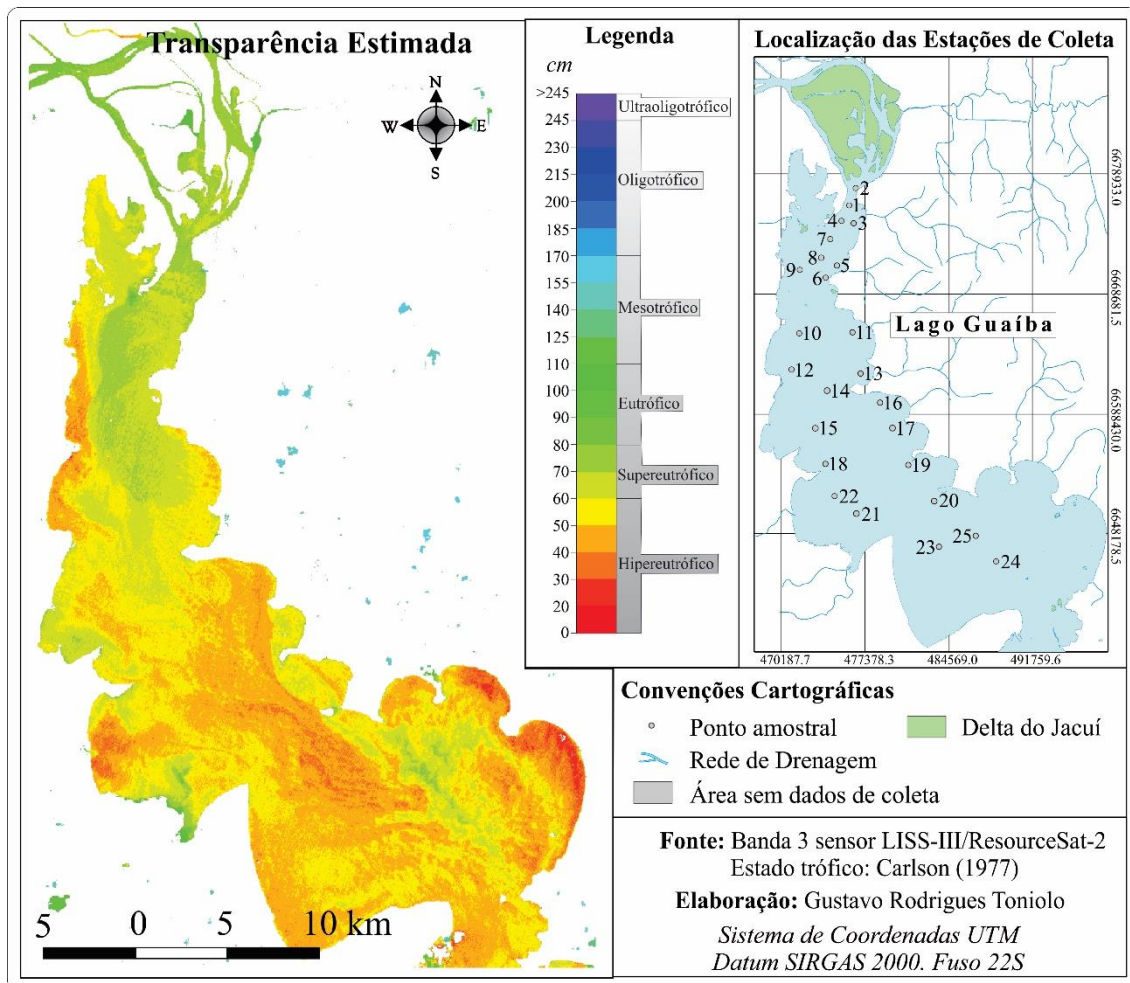


Figura 44 - Estimativa de Transparência do Disco de Secchi (Banda 3 do sensor LISS-III, 8 de fevereiro de 2015).

Os maiores valores de transparências do Disco de Secchi verificados no compartimento norte do Lago, e próximo a ponta do Itapuã ao Sul, com transparência chegando a 80 cm, ou seja, o modelo gerou valores superestimados já que a transparência máxima verificada no período foi de 78 cm. Já os menores valores são encontrados no compartimento central e ao sul do Lago, entre 20 a 30 cm. Em geral os algoritmos usados para a estimativa da variação espacial

das variáveis por meio das imagens do sensor LISS-3 são constituídos com base nos dados de verdade de campo, sendo funcionais apenas dentro das datas estabelecidas.

Observa-se também que os modelos empíricos funcionam bem dentro dos limites observados nos locais onde houve amostragem de campo. Para reflectâncias menores ou maiores do que os pontos amostrais, o modelo empírico tende a errar mais. Desta forma, pode-se observar que o modelo empírico apresentou resultados visualmente melhores que os apresentados pelo método de interpolação dos valores de transparência e turbidez apresentados nas figuras Figura 22 e 24.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos corroboram as hipóteses levantadas inicialmente no trabalho de que os dados espectrais obtidos por sensoriamento remoto são capazes de identificar a presença e discriminar a contribuição de cada constituinte opticamente ativo presente no Lago Guaíba.

O primeiro desafio nesta pesquisa esteve relacionado a disponibilidade frequente de dados limnológicos. Os dados disponibilizados pelo DMAE não se mostraram suficientes para subsidiar a abrangência do estudo, uma vez que eles vêm trabalhando com um reduzido número de estações de coleta mensais, além da amostragem não ser feita em um único dia do mês. Neste sentido, houve a necessidade da realização de coletas próprias, em concomitância com a passagem do satélite Landsat-8, cobrindo o fim de cada estação. Entretanto o fenômeno ENOS no ano de 2015 foi muito severo e a elevação da temperatura do oceano trouxe muita chuva a região comprometendo a maioria das imagens. Estes fatores acarretaram nas mudanças do objetivo inicial deste trabalho que era de se estudar a dinâmica sazonal do Lago.

O objetivo geral estabelecido para esta pesquisa somente foi atingido com a integração dos dados coletados de natureza limnológica e espectral. O objetivo geral foi “*caracterizar as águas do lago Guaíba - RS, quanto as suas propriedades ópticas, a partir da integração de dados de sensoriamento remoto orbital e de Espectrorradiometria de campo*”. O Guaíba pode ser caracterizado como um lago interior tipicamente turvo e opticamente complexo, em que os sólidos em suspensão determinaram o seu comportamento espectral. A reflectância na banda do vermelho do sensor OLI/Landsat-8 apresenta variação espacial e temporal. E sua variabilidade tem relação com volume pluviométrico. A análise visual dos espectros obtidos no dia 09 de fevereiro de 2015 e sua comparação com espectros da literatura (LODHI *et al.*, 1997; RUNDQUIST, 1996; KIRK, 2011; ENNES, 2008; CORAZZA, 2015) sugeriu que a água

do Lago tem presença de sólidos e clorofila-a. Sendo assim, a radiação ao penetrar a camada mais superior do corpo d'água foi espalhada principalmente por sólidos, aumentando a magnitude da reflectância, e absorvida em certas faixas de comprimentos de onda pela clorofila-a, definindo feições características.

Considerações acerca dos objetivos específicos:

*“Relacionar a reflectância das águas do Lago Guaíba, no contexto espaço-temporal com dados de precipitação pluviométrica”.*

A análise da reflectância média da água do Guaíba de uma série temporal da banda do vermelho dos sensores OLI e LISS-III e sua integração com o montante de chuvas ocorridas na região nos 16 dias anteriores a data de passagem destes satélites permitiu verificar a influência das chuvas ocorridas na estação meteorológica de Porto Alegre (83967) na reflectância da água. Regressão empírica explicou que 58% da variação da reflectância esteve associada ao acúmulo de chuvas nestes períodos.

A reflectância espectral das bandas do vermelho no Lago Guaíba apresenta variação espacial e temporal. Os maiores valores de reflectância foram para os meses de outubro, novembro e dezembro, correspondendo a estação chuvosa e de maior vazão. Já os menores reflectâncias em janeiro, fevereiro e abril, correspondendo a os meses de pouco volume precipitado. Andrade Neto (2012) em estudo sobre a variabilidade temporal da descarga sólida em suspensão associou os mesmos períodos a maiores e menores valores de sólidos em suspensão na água.

Desta forma, as altas reflectâncias na banda do vermelho de uma série temporal esta associada a alta concentração de TSS. Além disso, os ventos segundo autores (NICOLODI, 2007; PAZ *et al.*, 2005) podem estar relacionados ao surgimento de compartimentos espectrais específicos no interior do lago, principalmente em setores onde ocorre praticamente estagnação do fluxo, como as enseadas. Desta forma, mudança na direção dos ventos, podem provocar alterações no fluxo de sedimentos fora da tendência esperada. E a reflectância pode estar assim condicionada nestas regiões aos padrões de circulação e alterações na velocidade e intensidade do vento.



Neste aspecto, o sensoriamento remoto tem se mostrado extremamente útil, pois possibilitou por meio de sua visão sinótica ampliar a representatividade espacial de aspectos que estão estritamente relacionados a presença de sólidos inorgânicos em suspensão na água.

*“Verificar o potencial da aplicação da análise derivativa e remoção do contínuo sobre dados hiperespectrais da água medidos por espectrorradiômetro, visando identificar os COAs que determinam a reflectância da água do Guaíba”.*

A análise derivativa mostrou-se eficiente para realçar as feições nos espectros, tanto na primeira como segunda derivação. Sendo assim, algumas feições que não eram muito evidentes foram salientadas após a primeira derivação. O aumento das correlações após a derivação comprova que esta técnica aumenta o contraste espectral e a precisão das estimativas, conforme preconizado por Goddin *et al.* (1993).

Dentre as correlações significativas entre a primeira derivada, e variáveis limnológicas, no dia 09 de fevereiro de 2015, destacam-se as faixas de 584 nm ( $r = 0,60$ ) com TSS e TUR e DS; 653-674 nm ( $r = 0,81$ ) com DS; 655-674 e 675-700 nm com TSS, TUR e Chl-*a*; 710-733 nm com TUR e TSS; e 870 nm ( $r = -0,69$ ) com Chl-*a*.

A primeira derivada em 772 nm explicou 44% da variação devido ao TSS. Já em 690 nm, a primeira derivada explicou 32% da variação na concentração de clorofila-*a*, resultado semelhante ao encontrados por Rundquist *et al.*, (1996). Os melhores resultados foram observados nas variáveis TUR e DS. Em 670 nm a primeira derivada explicou 66% da variação para turbidez. A partir destes resultados pode-se concluir que os baixos valores de clorofila-*a* não são suficientes para determinar a resposta nos comprimentos de onda especificados, sendo determinada pela presença de sólidos na água.

A técnica da remoção do contínuo foi capaz de delinear e realçar 4 bandas de absorção das curvas de reflectância do Lago Guaíba, melhorando a visualização das variações nos espectros. As principais bandas de absorção encontradas foram em 400 a 580 (A), 588 a 622 (B), 648 a 690 (C) e 690 a 750 nm (D). As maiores profundidades estão na última banda (D) de comprimentos de onda mais longos. Para banda B encontrou-se graus de correlação forte entre variáveis, tanto negativas como positivas,

turbidez e transparência ( $r = 0,81$  e  $-0,83$ , respectivamente). Para clorofila-*a* foi na banda de absorção C, com pico em 689 nm ( $r = -0,60$ ).

A correlação entre variáveis opticamente ativas e curvas de primeira e segunda derivada e parâmetros do contínuo removido, mostrou que a variável pigmentos totais forneceu melhores resultados de correlação, indicando sua ocorrência no reservatório.

*“Avaliar o potencial das imagens de satélite em estimar e mapear a distribuição espacial dos COA’s”.*

Este trabalho mostrou um uso potencial das imagens do sensor LISS-III/ResourceSat-2 em estimar alguns parâmetros de qualidade da água no Lago Guaíba. Utilizando regressões lineares foi possível estimar os parâmetros de turbidez e profundidade do Disco de Secchi (transparência).

Os ajustes das regressões entre os dados LISS-III e as concentrações de totais de sólidos em suspensão e de clorofila-*a* não deram bons resultados, mesmo para ajustes não lineares.

Os dados limnológicos coletados em campo indicam que o Lago Guaíba apresenta água bastante turbida, com muita uma relativa concentração de sedimentos em suspensão nesta época do ano, e baixa concentração de clorofila-*a*. Os dados e sensoriamento remoto como fonte adicional de informações sobre o ecossistema aquático do Lago Guaíba, são de extrema utilidade.

## 6 REFERÊNCIAS

ANDRADE NETO, J.S.; RIGON, L. T.; TOLDO JR, E .E.; CHETTINI, F. Descarga Sólida Em Suspensão Do Sistema Fluvial Do Guaíba, RS, E Sua Variabilidade Temporal. In: Pesquisa em Geociências Vol.39.nº2, 2012.p.161-17

APHA. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20. ed. American Public Health Association, Washington, DC.

ASD (Analytical Spectral Devices, Inc.). **FieldSpec HandHeld Spectroradiometer: User's Guide**. Disponível em: <<http://support.asdi.com/Document/Documents.aspx>>. Acesso em 14 de outubro de 2014.

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/Rio Amazonas**. 2005. 286 p. (INPE-14614-TDI/1193). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZGivnJSY/KfjFc>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

BARTLETT, M. S. Properties of sufficiency and statistical tests. Proceedings of the Royal Society, Series A, v.160, p.268–282, 1937.

BERNARDO, N. M. R.. Análise do potencial do sensor OLI (Operational Land Imager) a bordo do Landsat-8 em estimar a concentração dos sólidos totais em suspensão no reservatório de Barra Bonita. 118f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.

BRANDO, V.E.; DEKKER, A.G. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. In: **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, v. 41, n. 6, p.1379- 1387,2003.

BREUNIG, F.; WACHHOLZ, F.; Pereira Filho, W.; RUDORFF, C. M.. Análise das propriedades óticas do reservatório Rodolfo Costa e Silva - Itaara, RS, Brasil, utilizando dados espectrais de campo e imagens orbitais multiespectrais. **Revista Ambiente e Água**, v. 2, n.2, p. 88-102. 2007.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CARLSON, R. T. A trophic state index for lakes. *Limnologia and Oceanography*. V.22, n.2, p. 361-369, 1997.

CHEN, Z. et al. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. *Remote Sensing Environment.*, St. Paul, v. 40, p. 46-59, 1992.

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

CORAZZA, R.; PEREIRA FILHO, Waterloo ; BASSO, L. A. . Influência da precipitação pluviométrica nas características espectrais e limnológicas do reservatório Dona Francisca e do Lago Guaíba, Rio Grande do Sul.. Para Onde!?, (UFRGS), v. 7, p. 01-11, 2013.

CORAZZA , Rosana. Identificação de florações de algas no Lago Guaíba com uso de imagens de satélite e espectrorradiometria de campo. Tese de Doutorado (Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/134706>>. Acesso em 20 dez 2015.

DEKKER, A. G. Detection of Optical Water Quality Parameters for Eutrophic Water by High Resolution Remote Sensing. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 1993.

DMAE. DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS DE PORTO ALEGRE. **A ocorrência de florações no Lago Guaíba**. Disponível em: <[http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/cs/usu\\_doc/ocorrencia\\_de\\_floracoes\\_lago\\_guaiba.pdf](http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/cs/usu_doc/ocorrencia_de_floracoes_lago_guaiba.pdf)>. Acesso em: 14 de jun 2015.

DOXARAN, D.; FROIDEFOND, J. M.; LAVENDER, S.; CASTAING, P.; Spectral signature of highly turbid waters: application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sens. Environ.*, 81, 149–61. 2002.

ENNES, J. **Potencial das imagens hiperespectrais orbitais na detecção de componentes opticamente ativos no reservatório de Itapararanga**. 125f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

ESTEVES, F. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 602 p.

FELIX, I. M. Monitoramento da Qualidade da Água Utilizando-se Modelos Empíricos Obtidos a partir de Dados de Sensoriamento Remoto de Barra Bonita - SP. **Anais VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil**, p. 119–127, 1993.

GALVÃO, L. S. Métodos para análise de espectros de reflectância. In: Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília: Editora da UNB, 2001. p.225-247. 2001.

GARDNER, M. J.; ALTMAN, D. G. Confidence intervals rather than P values: estimation rather than hypothesis testing. In: *Statistics in Medicine*. British medical journal. v 292 15 mar 1986

GOODIN, D. G. HAN, L., FRASER, R. N., RUNDQUIST, D. C., STEBBINS, W. A.. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n. 4 OP - Nein, p. 505–510 ST – Analysis of suspended solids in wate, 1993.

HORIBA PROCESS & ENVIRONMENTAL. U-50 Series **Multi-parameter Water Quality Meters**. Disponível em: <[www.horiba.com/fileadmin/uploads/Process-Environmental/Documents/HRE1930C-U50.pdf](http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Process-Environmental/Documents/HRE1930C-U50.pdf)>. Acesso em: 23 set. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico de 2010. In: Censo Demográfico 2000 – Resultados do Universo. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default\\_resultados\\_universo.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default_resultados_universo.shtm)>. Acesso em: 25 nov. 2014.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Boletim Climático para o Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/boletimRioGrandeDoSul>>. Acesso em 03 ago 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Clima/Estações e Dados. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 25 de ago. 2014.

HERMES, L. C. ; SILVA, A. de S. . **Avaliação da qualidade das águas**: manual prático. 1. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. v. 1. 55p .

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução José Carlos Epiphanyo (coordenador) *et al.* 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011

KIRK, JOHN. T. O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems**. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B.; BOARDMAN, J.W.; HEIDEBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J.; GOETZ, A.F.H., The Spectral Image Processing System (SIPS)- Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v.44, n.2, p.145-163, 1993.

LABSPHER, Inc. *Spectralon*, North Sutton, NH – USA. <http://www.labsphere.com>. 2015.

LIVI, P. Elementos do clima: o contraste dos tempos frios e quentes. In: Menegat, R., Porto M. L., Carraro, C. C., Fernandes, L. A. D., 1998. In: Atlas Ambiental de Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS. 1998.

LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S.; The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface waters. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 33: 111–117. DOI:10.1111/j.1752-1688.1997.tb04087.x

MACKINNEY, G. Absorption of light by chlorophyll solutions. **The Journal of Biological Chemistry**. v. 140, 1941. p. 315 – 322.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L.; Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperature. EOSAT Landsat Technical Notes, Nº 1, August, 8p., 1986.

MATTHEW et al. Atmospheric Correction of Spectral Imagery: Evaluation of the FLAASH Algorithm with AVIRIS Data. In: Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 31., 2002, Proceedings... p. 157- 163, 2002.

MCFEETERS S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, 1996. 17 (7):1425-1432.

MONTANHER, O. C. **Modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas a partir de imagens landsat 5**. 2013. 143 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.26.19.52-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DKMAES>>. Acesso em: 29 jul. 2016.

MORREY, J. R. On determining spectral peak positions from composite spectra with a digital computer. **Anal.Chem.**, v. 40, n. 6, p. 905–914, 1968.

NICOLODI, J. L. O Padrão de ondas no lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação. Tese de Doutorado (Geociências). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 2007. Disponível em:< <http://hdl.handle.net/10183/10817>>. Acesso em: 25 mar 2014.

NICOLODI, J. L.; TOLDO JR, Elírio e ; FARINA, L. . Dinâmica e ressuspensão por ondas no Lago Guaíba (RS, Brasil) e implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano. *Pesquisas em Geociências (Online)*, v. 37, p. 25-39, 2010.

NOBREGA, I. W. **Análise espectral de sistemas aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos**. 2002. 85 p. (INPE-13059-TDI/1023). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.08.16.41>>. Acesso em: 14 fev. 2015.

NOVO, E. M. L. M.; TUNDISI, J. G. . Sensoriamento remoto de águas interiores: perspectivas. In: Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto,5, 1988, Natal. *anais do 5o Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos: INPE, 1988. p. 13-21.

NOVO, E.M.L.M; SHYMABUKURO, Y. E. Spectral Mixture Analysis of inland tropical waters. **International Journal of Remote Sensing**. v.15, n. 6, p. 1356-1356, 1993.

NOVO, E. M. L. de M. Comportamento Espectral da Água. In: Meneses, P. R., Madeira Netto, J. da S. (Orgs.). **Sensoriamento remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília: Universidade de Brasília, 2001, p. 203-221.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher. 2011.

NOVO, E. M. L. M.; STEFFEN, C. A.; BRAGA, C. Z. F.. Results of a Laboratory Experiment Relating Spectral Reflectance to Total Suspended Solids. *Geografia* (Rio Claro), 1991.

NRSA – National Remote Sensing Agency, India. IRS-P6 Data User's Handbook. 2003.142p.

OLIVEIRA, B. S. ; MATAVELI, G. A. V. . Avaliação do desempenho dos classificadores Ioseg e Bhattacharya para o mapeamento de áreas de cana-de-açúcar no município de Barretos-SP. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. Anais XVI SBSR, 2013.

PAZ, A. R.; REIS, L. G. M. ; LIMA, H. V. C. . Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para Enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS). In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI SBRH, 2005.

PEREIRA FILHO, W.; GALVÃO, Lênio Soares . Relações entre reflectância espectral e concentração de sedimentos em suspensão no reservatório Passo Real, região sul do Brasil.. in: VIII simposio latinoamericano de percepcion remota, 1997, merida-venezuela, 1997.

PREISENDORFER, R. W..Secchi disk science: visual optics of natural waters. *Limnology and Oceanography* 31: 909–926.1986

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 7 ed. Uberlândia: Edufu. 2009

ROSSATO, M. S. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. p. 240, 2011.

RUDORFF, C. M. et al. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 2, p. 269 – 280, 2007.

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

STEFFEN, C. A. Técnicas radiométricas com o SpectronSE-590. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8, 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 969-975.

TANG, J. W., G. L. TIAN, X. Y. WANG, X. M. WANG; Q. J. SONG. Methods of water spectra measurement and analysis I: above water method. *Journal of Remote Sensing* 8(1): 37–44. 2004.

TEBALDI, C. Relação entre Parâmetros de Qualidade de Água e Dados do Sensor OLI, LANDSAT 8, no Guaíba - Rio Grande do Sul, Brasil. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre Rio Grande do Sul. 2015.

TOLDO JR., E. E.; ALMEIDA, L. E. S. B. Rio Guaíba. 2009. Disponível em: <[http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu\\_doc/rioguaiba\\_eliriotoldojr.pdf](http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu_doc/rioguaiba_eliriotoldojr.pdf)>. Acesso em: 05 de Junho de 2015.

TSAI, F.; PHILPOT, W. D. Derivative analysis of hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 1, p. 41–51, 1998.

USGSa. 2015. Landsat 8. Data User's Handbook. Version 1.0, June, 2015. Department of the Interior -U.S. Geological Survey –NASA. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>. Acesso em 06/11/2015.

ZHANG, J.; RIVARD, B.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A. Derivative Spectral Unmixing of Hyperspectral Data Applied to Mixtures of Lichen and Rock. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 42, n. 9, p. 1934-1940, 2004.

WACHHOLZ, F. Compartimentação aquática do reservatório Rodolfo Costa e Silva-RS, a partir de variáveis limnológicas e imagens orbitais. 2007. 97f.. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007

WACHHOLZ, Flávio; PEREIRA FILHO, Waterloo ; PEREZ FILHO, A. . Compartimentação aquática espectral dos reservatórios em cascata no alto Jacuí. RS. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos: Inpe, 2009. p. 4929-4935.

WEAVER, E. C.; WRIGLEY, R. Factors Affecting the Identification of Phytoplankton Groups by Means of Remote Sensing. Moffet Field: NASA Technical Memorandum 108799, 1994.

WETZEL, R.G.; Likens, G.E. 1991. Limnological analyses. SpringerVerlag, New York. 391pp.