

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

Illa de Andrade Bicca

**COMPARAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO EM LAGOS DA  
AMAZÔNIA E DO RIO GRANDE DO SUL A PARTIR DE DADOS  
ESPECTRAIS**

Santa Maria, RS.  
2018

**Illa de Andrade Bicca**

**COMPARAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO EM LAGOS DA AMAZÔNIA E DO RIO GRANDE DO SUL A PARTIR DE DADOS ESPECTRAIS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Geografia**.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Waterloo Pereira Filho  
Coorientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Cláudio Clemente Faria Barbosa

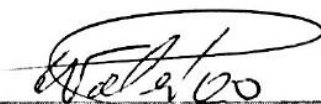
Santa Maria.RS.  
2018

Illa de Andrade Bicca

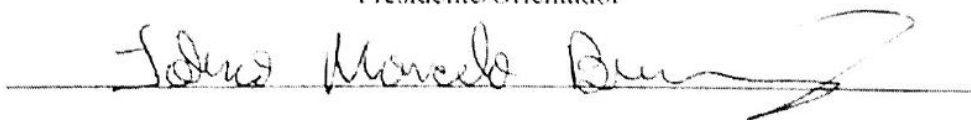
**COMPARAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO EM LAGOS DA AMAZÔNIA E DO RIO GRANDE DO SUL A PARTIR DE DADOS ESPECTRAIS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Geografia**.

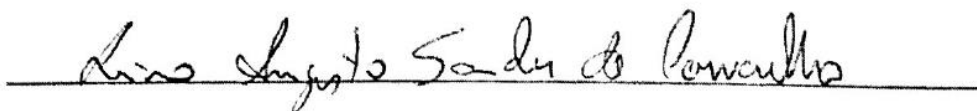
Aprovado em 10 de Janeiro de 2018



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



**Fábio Breunig, Dr. (UFSM)**



**Lino Augusto Sander de Carvalho, Dr. (INPE)**

Santa Maria, RS  
2018

## RESUMO

### COMPARAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO EM LAGOS DA AMAZÔNIA E DO RIO GRANDE DO SUL A PARTIR DE DADOS ESPECTRAIS

AUTORA: Illa de Andrade Bicca  
ORIENTADOR: Waterloo Pereira Filho  
COORIENTADOR: Cláudio Clemente Faria Barbosa

A presente pesquisa teve como objetivo geral comparar espectros de reflectância de diferentes massas aquáticas, localizadas em diferentes biomas do Brasil. Para isto, foram realizadas duas campanhas de campo, sendo a primeira realizada na Usina Hidrelétrica Passo Real, lago artificial construído para geração de energia, localizado no estado do Rio Grande do Sul e, a segunda, no Lago Grande do Curuai, um lago natural com períodos de cheias bem definidos, localizado no estado do Pará. A partir de dados espectrais de reflectância e dados de TSS obtidos in loco foi realizado o agrupamento dos espectros nas áreas de estudo, além do ajuste de modelos de regressão para verificar a influência do TSS nos espectros de reflectância. Entre os modelos gerados, o mais adequado para as duas áreas foi ajustado a partir da segunda derivada da reflectância em 757 nm, com  $R^2 = 0,72$  em Passo Real e 777 nm, com  $R^2 = 0,75$ .

**Palavras-chave:** Modelos empíricos. Sólidos em suspensão. Planície do Lago Grande do Curuai. UHE Passo Real. sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

### COMPARISON OF SUSPENSION SOLIDS IN LAKES OF THE AMAZÔNIA AND RIO GRANDE DO SUL FROM SPECIAL DATA

AUTHOR: Ila de Andrade Bicca  
ADVISOR: Waterloo Pereira Filho  
COORIENTATOR: Cláudio Clemente Faria Barbosa

The present article aimed to compare reflectance spectra of different aquatic masses, located in different biomes of Brasil. Two field campaigns were carried out, the first being at the Passo Real Hydroelectric Power Plant, an artificial lake built for power generation, located in the state of Rio Grande do Sul, and the second at Lago Grande do Curuai, a natural lake with periods of the spectral grouping of the spectra was carried out in the study areas, as well as the adjustment of the regression models to verify the influence of the TSS in the spectra Reflectance. Among the generated models, the most suitable for the two areas was adjusted from the second derivative of the reflectance at 757 nm, with  $R^2 = 0.72$  in Real Step and 777 nm, with  $R^2 = 0.75$

Keywords: Empirical models, Solids in suspension, Planície do Lago Grande do Curuai, UHE Passo Real, remote sensing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das áreas de estudo .....	15
Figura 2 - Localização da Planície do Lago Grande do Curuai em relação ao Brasil e ao estado do Pará.....	16
Figura 3 - Precipitação ocorrida em Óbidos de 2000 a 2015. ....	18
Figura 4 - Dinâmica da água da planície do Lago Grande do Curuai em função da variação da cota do Rio Amazonas.....	19
Figura 5 - Localização da UHE Passo Real em relação ao Brasil e ao estado do Rio Grande do Sul.....	20
Figura 6 - Precipitação em Passo Fundo de 2000 a 2015.....	21
Figura 7 - Medidas de reflectância da água clara e de água com diferentes concentração de sólidos em suspensão de solo siltoso.....	23
Figura 8 – Esquema explicativo da ferramenta SAM.....	28
Figura 9 - Organograma dos procedimentos metodológicos.....	29
Figura 10 – Espectro radiômetro Ramses TriOS.....	30
Figura 11 - Espectro-radiômetro de campo FieldSpec HandHeld.....	31
Figura 12 - Imagem do reservatório e os pontos amostrais adotados.....	33
Figura 13 - Pontos de coleta .....	34
Figura 14 - Sensores TriOs acima da água e em subsuperfície .....	34
Figura 15 - Estação de trabalho para filtragem das amostras.....	36
Figura 16 - Filtros .....	36
Figura 17 - Espectro de Reflectância da UHE Passo Real .....	39
Figura 18 - Espectro de reflectância de sensoriamento remoto medidos no Lago Grande do Curuai .....	40
Figura 19 - Primeira classe de agrupamento de espectros.....	41
Figura 20 - Segunda classe de espectros agrupados .....	42
Figura 21 - Terceira classe de espectros agrupados .....	43
Figura 22 - Primeira classe de espectros agrupados - Curuai.....	44
Figura 23 - Segunda classe de espectros agrupados - Curuai.....	45
Figura 24 - Terceira classe de espectros agrupados - Curuai .....	46
Figura 25 - Correlação entre Reflectância e TSS .....	47
Figura 26 – Modelo de regressão entre TSS e Reflectância.....	47
Figura 27 - Correlação entre TSS e derivada de primeira ordem.....	48

Figura 28 - Modelo de Regressão entre a derivada de primeira ordem e TSS em 764 nm .....	49
Figura 29 - Modelo de Regressão entre a derivada de primeira ordem e TSS em 758 nm .....	49
Figura 30 - Correlação entre TSS e derivada de segunda ordem .....	50
Figura 31 - Modelo de Regressão entre a derivada de segunda ordem e TSS em 759 nm .....	50
Figura 32 - Modelo de Regressão entre as derivadas de segunda ordem e TSS em 757 nm ...	51
Figura 33 - Correlação entre as reflectâncias e o TSS.....	51
Figura 34 - Correlação entre os sólidos inorgânicos e as reflectâncias .....	52
Figura 35 - Modelo de regressão entre TSS e as reflectâncias em 801 nm.....	53
Figura 36 - Modelo de regressão em TSS inorgânico e as reflectâncias em 803 nm.....	53
Figura 37 - Correlação entre as derivadas de reflectância e TSS .....	54
Figura 38 - Regressão entre TSS e a derivada de primeira ordem em 815 nm .....	54
Figura 39 - Regressão entre TSS inorgânico e as derivadas de primeira ordem das reflectâncias em 815 nm .....	55
Figura 40 - Correlograma entre a derivada de 2ª ordem e TSS .....	56
Figura 41 – Correlograma entre a derivada de 2ª ordem e TSS Inorgânico .....	56
Figura 42 - Modelo de Regressão entre a 2ª derivada e TSS em 777 nm .....	57
Figura 43 - Modelo de Regressão entre a 2ª derivada e TSS Inorgânico em 807 nm .....	57
Figura 44 - Espectros de reflectância de Passo Real e Lago Grande do Curuai na região do infravermelho próximo .....	59
Figura 45 - Simulação das bandas centrais do Sentinel a partir de dados de reflectância de Passo Real.....	60
Figura 46 - Correlação entre as bandas simuladas do Sentinel-2 e TSS em Passo Real .....	61
Figura 47 - Modelo entre as bandas simuladas do Sentinel 2 e TSS em Passo Real .....	61
Figura 48 - Simulação das bandas do Sentinel 2 .....	62
Figura 49 - Correlograma entre TSS e bandas centrais do Sentinel 2.....	63
Figura 50 - Modelo de Regressão de TSS inorgânico em 783 nm .....	63
Figura 51 - Modelo de Regressão de TSS em 783 nm .....	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de água da Amazônia por Sioli (1968) - Traduzida e adaptada pela autora	17
Quadro 2 - Concentração de TSS nos pontos amostrais de Passo Real .....	38
Quadro 3 - Concentração de TSS em cada ponto amostral .....	39
Quadro 4 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na primeira classe .....	41
Quadro 5 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na Classe 2.....	42
Quadro 6 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na classe 3.....	43
Quadro 7 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na classe 1.....	44
Quadro 8 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na classe 2.....	45
Quadro 9 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na classe 3.....	46



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo Geral.....	14
2.2	Objetivos Específicos .....	15
3	CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO .....	15
3.1	Planície do Lago Grande do Curuai – PA.....	16
3.2	Reservatório Passo Real – RS.....	19
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	22
4.1	Limnologia.....	22
4.1.1	Total de Sólidos em Suspensão (TSS).....	22
4.2	Sensoriamento Remoto da água.....	24
4.2.1	Propriedades óticas da água.....	25
4.3	Análise dos espectros de reflectância .....	26
4.3.1	Análise derivativa .....	27
4.3.1.1	Regressão Linear .....	27
4.4	Spectral Angle Mapper (SAM) .....	27
5	METODOLOGIA .....	29
5.1	Equipamentos utilizados.....	30
5.1.1	Ramses TriOs® .....	30
5.1.2	Espectro radiômetro Fieldspec® HandHeld .....	30
5.2	Simulação de bandas centrais do Sentinel-2.....	31
5.3	Pontos coletados na UHE Passo Real .....	32
5.4	Pontos coletados na Planície do Lago Grande do Curuai .....	33
5.4.1	Total de sólidos em suspensão .....	35
5.5	Geração de Padrões espectrais .....	36
6	RESULTADOS OBTIDOS .....	38
6.1	UHE Passo Real.....	38
6.2	Espectro de reflectância de Passo Real – RS .....	38
6.3	Lago Grande do Curuai.....	39
6.4	Espectro de reflectância do Lago Grande do Curuai - PA.....	39
6.4.1	Padrões Espectrais de Passo Real – RS .....	40
6.4.2	Padrões Espectrais do Lago Grande do Curuai - PA.....	43

6.5	Correlação e Modelos de regressão relacionados com TSS .....	46
6.5.1	Passo Real – RS .....	46
6.5.2	Lago Grande do Curuai .....	51
6.6	Comparação dos espectros de reflectância .....	58
6.7	Simulação de bandas centrais do Sentinel-2.....	60
6.7.1	UHE Passo Real .....	60
6.7.2	Lago Grande do Curuai .....	62
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	65
8	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país abundante em corpos d'água continentais que possuem grande valor à sociedade, uma vez que propiciam cultivos agrícolas e garantem a sobrevivência dos seres humanos. Embora o País seja abundante no que diz respeito à água doce, a distribuição é desigual em relação às suas regiões, sendo que 80% da disponibilidade hídrica do País se encontram na região hidrográfica Amazônica, enquanto que, em outras regiões, como a Nordeste, a distribuição de água é comprometida devido às secas recorrentes. Segundo o relatório de conjuntura dos recursos hídricos no Brasil (ANA, 2013), a disponibilidade hídrica da região hidrográfica (RH) Amazônica é de 73.748 m<sup>3</sup>/s, enquanto que a RH Atlântico Nordeste-oriental é de 91 m<sup>3</sup>/s. A RH Atlântico Sul, onde está inserida a bacia hidrográfica do Alto Jacuí, por sua vez, possui disponibilidade hídrica de 647 m<sup>3</sup>/s. A partir destes dados é evidente a diferença entre a distribuição de água doce da RH Amazônica comparada ao restante do Brasil.

Em contrapartida à qualidade dos recursos hídricos está a ação antrópica que, muitas vezes, impactam negativamente os corpos d'água, como o cultivo de monoculturas, além do agravante da utilização de agrotóxicos. No Rio Grande do Sul, como em outros estados brasileiros, a ação antrópica ameaça a qualidade da água devido à retirada de mata ciliar para agricultura e pecuária. Os cultivos no entorno dos corpos aquáticos e conseqüentemente a utilização de agrotóxicos, impactam na qualidade das massas d'água, podendo gerar prejuízos ambientais. Na Amazônia, por sua vez, há atuação da pecuária, juntamente com a expansão das culturas de soja. Diante deste cenário, cada vez mais se vê preocupação com o impacto ambiental causado pela ação antrópica em rios, lagos e demais massas d'água.

No âmbito dos estudos da água, o Sensoriamento Remoto é uma ferramenta importante, uma vez que possibilita análise e estudos em grandes extensões de terra, como é o caso do Brasil. Além disso, a partir da refletância de sensoriamento remoto é possível não só detectar e identificar alguns constituintes existentes na água, como também diferentes comportamentos espectrais das massas de água. Cada vez mais o sensoriamento remoto vem sendo utilizado para monitoramento e controle ambiental dos corpos d'água que, diferente de outros alvos naturais, como vegetação, e geologia, se apresenta de forma dinâmica. Diante disso, o estudo de massas d'água com uso do sensoriamento remoto possui características únicas, além de possuir algumas limitações quando comparado a outros alvos (NOVO, 1992). Uma das características que diferenciam o sensoriamento remoto da água em relação a outros

alvos terrestres é a estreita faixa do espectro eletromagnético utilizada para os estudos, uma vez que há baixa irradiância solar na superfície terrestre em comprimentos de onda abaixo de 400 nm, bem como o aumento da absorção da energia eletromagnética pela água em comprimentos de onda maiores que 850 nm. Estas limitações fazem com que a faixa mais utilizada do espectro eletromagnético em estudos das massas de água seja de 400 a 850 nm (KIRK, 2011).

Embora o sensoriamento remoto ótico seja uma ferramenta adequada para os estudos de corpos aquáticos, é preciso conhecer e quantificar certos constituintes na água e, para isto, a Limnologia é uma grande aliada, pois a integração entre estes garante maior precisão e complexidade nas pesquisas, devido à relação com as variáveis limnológicas, como matéria orgânica, clorofila e sólidos em suspensão. Estas variáveis, quando relacionadas com as reflectâncias, propiciam uma análise mais completa, uma vez que constituem os componentes opticamente ativos, que influenciam diretamente o espectro de reflectância.

Neste estudo, a variável limnológica a ser abordada é o total de sólidos em suspensão (TSS) que, segundo KIRK (2011) E JENSEN (2009), compreende o material suspenso, geralmente composto por partículas orgânicas e inorgânicas que interagem com a radiação eletromagnética e modificam o comportamento espectral da água. Assim, o TSS é classificado como um componente opticamente ativo que é responsável pelo espalhamento, retroespalhamento e absorção da radiação dentro da água. Em suma, as partículas inorgânicas possuem maior domínio do espalhamento/retroespalhamento, sendo responsáveis pelo aumento da reflectância na região do vermelho e do infravermelho próximo. Já a absorção pode ser dominante do caso de haver partículas orgânicas presentes na coluna de água.

A combinação destas interações (espalhamento/absorção) da radiação eletromagnética com as partículas em suspensão é um dos fatores que resultam na cor da água e quanto maior a concentração de TSS, maior o espalhamento e absorção da radiação eletromagnética. Em síntese, enquanto o espalhamento tende a aumentar a radiação emergente da água, a absorção tende a reduzir esta radiação.

O TSS é uma das principais variáveis utilizada em estudos de ambientes aquáticos devido sua influência na resposta espectral e a cor das massas de água (KIRK, 2011). Entre os estudos relacionados ao TSS estão os de MILLER e MCKEE (2004), onde utilizaram imagens do sensor MODIS para mapear as concentrações de matéria em suspensão em águas costeiras; MONTANHER et.al. (2014), no qual foram ajustados modelos empíricos para estimar a concentração de TSS em rios de águas brancas da Amazônia usando Landsat 5/TM; FAGA et. al. (2015), que ajustaram modelos empíricos para estimar a concentração de TSS e Chl-a no

Rio Bonito (SP) a partir de análise derivativa e ROTTA et. al. (2015), pesquisa na qual foram desenvolvidos modelos empíricos para estimar a concentração de Chl-a e TSS no reservatório de Nova Avanhandava (SP), a partir dos coeficientes de absorção e retroespalhamento.

Esta pesquisa trata de dois corpos d'água distintos e localizados em diferentes regiões do Brasil, sendo o primeiro, reservatório Passo Real, localizado no estado do Rio Grande do Sul, em sua porção centro-norte e é reconhecido como o maior lago artificial do estado, e o segundo, Lago Grande do Curuai, localizado na planície de inundação amazônica, no estado do Pará. O reservatório Passo Real localiza-se no alto curso do rio Jacuí e é um dos reservatórios em cascata construídos ao longo deste curso d'água.

Os reservatórios existentes na bacia do rio Jacuí, bem como a UHE Passo Real são alvos de diversas pesquisas no laboratório de Geotecnologias do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), filial de Santa Maria/RS, como a de WACHHOLZ (2011), que analisou a estruturação limnológica e espectral em uma escala espaço-temporal nos reservatórios Passo Real e Dona Francisca; SANTOS (2012), que estudou a influência dos constituintes opticamente ativos na reflectância espectral da água em Passo Real; PRADO (2014), que comparou variáveis limnológicas nos reservatórios de Itaúba e Dona Francisca; e PAULA (2015), em estudo no qual a autora relacionou as variáveis limnológicas com as reflectâncias no reservatório de Passo Real;

O reservatório da UHE Passo Real não é importante apenas para a geração de energia. Ele também garante o sustento de parte da população da região, como é caso dos pescadores, além de ser utilizada como área de lazer para a população, servindo, em muitos casos, como ponto de encontro e de esportes (SANTOS, 2012). Na construção da UHE Passo Real, o município mais atingido e ao mesmo tempo o que configura a maior área dos municípios do limítrofes ao reservatório é o de Fortaleza dos Valos, que possui população de 4.575 pessoas e área de 630,365 Km<sup>2</sup>, com densidade demográfica de 7,03 hab/Km<sup>2</sup> (IBGE, 2010).

Ao contrário de Passo Real, Lago Grande do Curuai, trata-se de um lago natural localizado na região norte do País. Este grande lago recebe afluentes de rios com diferentes origens e tipos de água diversos. O Lago Grande do Curuai está localizado no município de Santarém e configura-se como o maior de um conjunto de vinte lagos, que se interligam (BARBOSA, 2005). Além disso, por se localizar no médio curso do rio Amazonas, é foco de diversas pesquisas, como a tese de BARBOSA (2005), na qual estudou o sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água na planície de Curuai e Rio Amazonas; RUDORFF (2011), que classificou as águas da planície de inundação do Rio Amazonas, com uso do Spectral Angle Mapper (SAM) e uma biblioteca espectral; FERREIRA (2012), pesquisa na

qual estimou a concentração de clorofila na Planície de Curuai/Amazonas a partir de dados fluorométricos e espectrais;

O município de Santarém/PA, diferentemente do município de Fortaleza dos Valos/RS, possui população de 294.580 habitantes, área de 17.898,388 Km<sup>2</sup> e densidade demográfica de 16,45 hab/Km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). O distrito de Curuai, pertencente à Santarém localiza-se ao sul do Grande Lago e possui população de 16.726 habitantes.

É importante salientar que os dois municípios possuem uma grande diferença em relação as suas áreas e número de população. Isto acontece devido à extensão do município de Santarém e por este pertencer à região Amazônica, onde existem muitas unidades de conservação, reservas indígenas e grandes áreas de florestas (IMAZON, 2013). Além disso, a atividade agrícola predomina no município de Fortaleza dos Valos, sendo os principais cultivos o de soja, milho e, em menor quantidade, o trigo. A pecuária se concentra, em sua maioria, na criação de bovinos (CENSO AGROPECUÁRIO IBGE, 2006). Por outro lado, o município de Santarém tem sua produção voltada a aquicultura e a criação de gado, além dos cultivos agrícolas de mandioca e, em menor escala, a soja, segundo o Censo Agropecuário do IBGE (2006). Contudo, ocorreu grande expansão de culturas de soja na região.

As duas áreas de estudo apresentam-se distintas tanto no que diz respeito a suas localizações, em regiões extremas do país (norte e sul) quanto a suas origens, uma vez que o Lago Grande do Curuai é sistema aquático natural, e o Lago Passo Real é artificial. Contudo as duas áreas têm grande importância aos municípios vizinhos e aos estados em que se localizam.

A comparação destes dois corpos d'água se faz importante devido à ação antrópica em seus entornos e a necessidade de monitoramento e conhecimento dos constituintes existentes na água que, dependendo de suas concentrações podem ser nocivas, tanto a população quanto ao ecossistema e a biodiversidade existente.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar um estudo comparativo entre os sólidos em suspensão na Planície do Lago Grande do Curuai (PA) e o reservatório Passo Real (RS), a partir de seus espectros de reflectância, relacionando- os com a concentração de sólidos em suspensão.

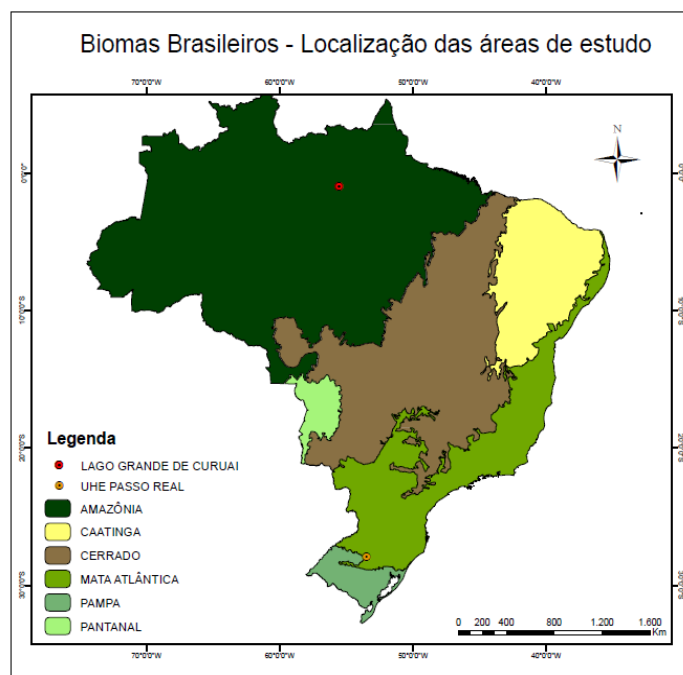
## 2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os espectros de reflectância do Lago do Curuai e do reservatório Passo Real;
- Relacionar as diferentes respostas espectrais com suas concentrações de sólidos em suspensão a partir de testes estatísticos e geração de modelos empíricos em cada área de estudo;
- Avaliar se os modelos gerados possuem aplicação nas duas áreas de estudo;
- Simular os espectros de reflectância com imagens do Sensor da Missão Sentinel 2;
- Verificar a eficiência dos modelos empíricos gerados a partir da simulação dos espectros do Sentinel-2 para a identificação dos constituintes e características dos corpos d'água;
- Comparar as análises da água nas duas áreas de estudo a fim de identificar semelhanças e diferenças.

## 3 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

A pesquisa tem como áreas de estudo dois pontos extremos do Brasil, um localizado no norte do País em uma região de clima tropical, configurado como bioma Amazônico, enquanto o outro, no Sul do Brasil, possui clima subtropical e localiza-se no bioma da Mata Atlântica (Figura 1).

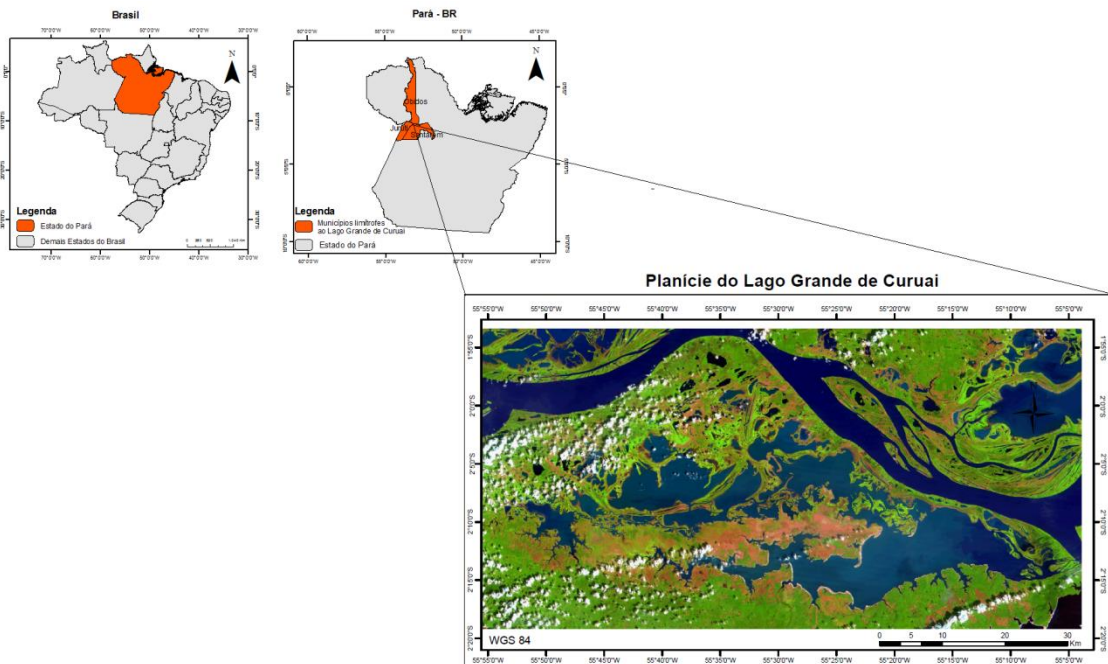
Figura 1 - Localização das áreas de estudo



### 3.1 Planície do Lago Grande do Curuai – PA

A planície do Lago Grande do Curuai, localizada no município de Santarém, ao Sul do município de Óbidos, no estado do Pará e dista 900 Km da foz do rio Amazonas (Figura 2).

Figura 2 - Localização da Planície do Lago Grande do Curuai em relação ao Brasil e ao estado do Pará.



Org.: BICCA, Illa

Fonte: IBGE (2010); Imagem de campo (2016)

O município de Santarém (PA) possui 294.580 habitantes, segundo o Censo de 2010 e área de 17.898,389 km<sup>2</sup>, sendo sua densidade demográfica de 12,87 hab/Km<sup>2</sup>. As atividades agrícolas predominante são a produção de arroz, soja e mandioca, chegando a ser considerado um dos maiores produtores do estado do Pará (SEAMPLAM, 2010). A agricultura familiar tem grande relevância dentro do município de Santarém. A pecuária, por sua vez, se dá principalmente na criação de gado bovino e, em menor escala, galináceos e suínos. A aquicultura também é muito comum no Município.

Geologicamente, Santarém está situado na porção central da Bacia Sedimentar do Amazonas, aflorando, na maior parte do seu território, na seção superior da Formação Alter do Chão (Cretáceo/Terciário) (EMBRAPA 2001).

No que diz respeito à planície, sua área compreende em aproximadamente 3.500 Km<sup>2</sup> e possui variação do nível da água de, no máximo, sete metros devido às cheias ocorridas em



períodos de precipitação intensa. Além disso, a planície do Curuai é constituída por vinte lagos interligados, sendo o maior o Lago Grande do Curuai, que possui aproximadamente comprimento de 50 Km (BARBOSA, 2005).

A planície do Curuai recebe diferentes tipos de água, uma vez que é inundada por cursos d'água oriundos de áreas distintas, com diferentes tipos de solo e condições climáticas. SIOLI (1965) classificou os tipos de água da Amazônia em águas claras, brancas e pretas. As águas do tipo clara são transparentes e possuem coloração verde, verde-amarelo ou verde-oliva, pH de 4,5 a 7,8 e com transparência (disco de secchi) de 1,10 a 4,30 metros, como por exemplo, as águas do rio Tapajós com influência do rio Juruema, e São Manoel e rio Xingu. As águas brancas têm coloração amarela e turva e possuem um pH de 6,2 a 7,2, com transparência de 0,10 a 0,50 metros e é rica em sedimentos suspensos e dissolvidos. Alguns exemplos são os rios Amazonas com Solimões, rio Madeira e rio Branco. Por último, as águas do tipo Pretas, como o nome já aponta, são águas com coloração mais escura, como verde-escuro ou marrom avermelhado, pobres em sólidos em suspensão e com pH de 3,8 a 4,9 e sua transparência varia de 1,30 a 2,30 metros. Um resumo dos tipos de água de Sioli (1968) é exposto no quadro 1.

A planície do Lago Grande do Curuai recebe majoritariamente águas de cor branca, proveniente do Rio Amazonas, águas claras, de rios localizados ao Sul e águas pretas, oriundas de florestas (BARBOSA, 2005).

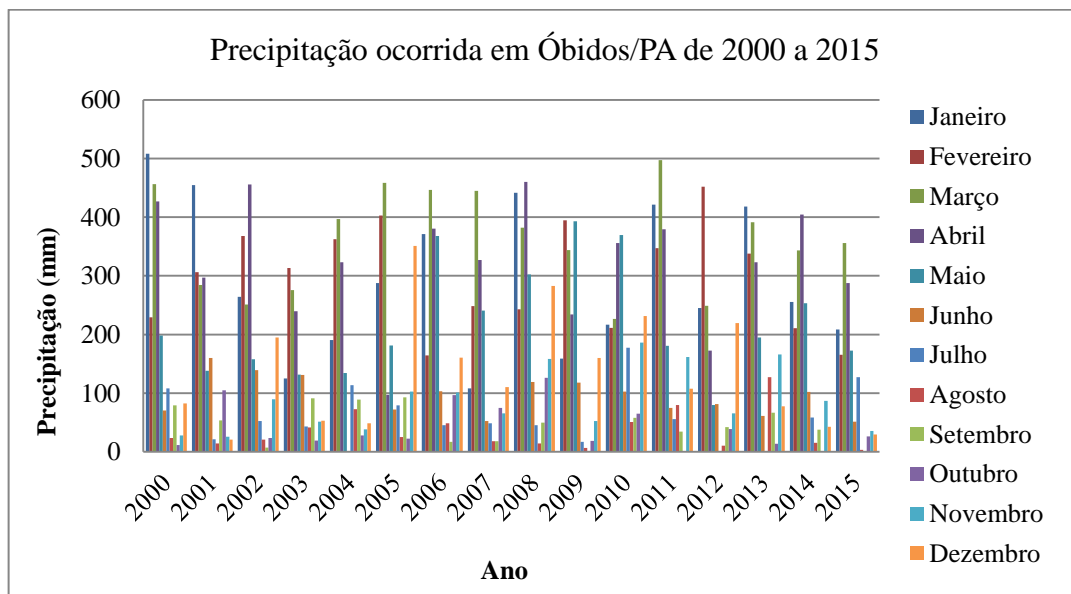
Quadro 1 - Tipos de água da Amazônia por Sioli (1968) - Traduzida e adaptada pela

<b>Tipos de água</b>	<b>Cor da água</b>	<b>Região</b>	<b>Solo</b>	<b>Vegetação</b>	<b>Exemplos</b>
Branças	Argiloso, ocre, turvo	Sopé dos Andes, Serra Parina	Argiloso	Floresta Andina	Amazonas, Rio Madeira
Claras	Amarelo-esverdeado para oliva, límpida, transparente	Brasil e Guiana, terra firme terciária da Amazônia	Argiloso	Floresta Amazônica	Tapajós
Pretas	Oliva para café, marrom avermelhado	Planos e peneplanos em geral	Podzólicos	Caatinga, campo arenoso	Rio Negro, Rio Cururu

Adaptado de SIOLI (1968)

A precipitação na planície do Lago Grande do Curuai entre os anos 2000 e 2015, a partir da estação meteorológica de Óbidos/PA, sinaliza o padrão temporal na distribuição de chuvas na bacia Amazônica (Figura 3). Em função disso, a Figura 4 traz a dinâmica padrão da água na planície do Lago Grande do Curuai nos meses de julho e dezembro, quando a planície atinge sua cota máxima e cota mínima, respectivamente.

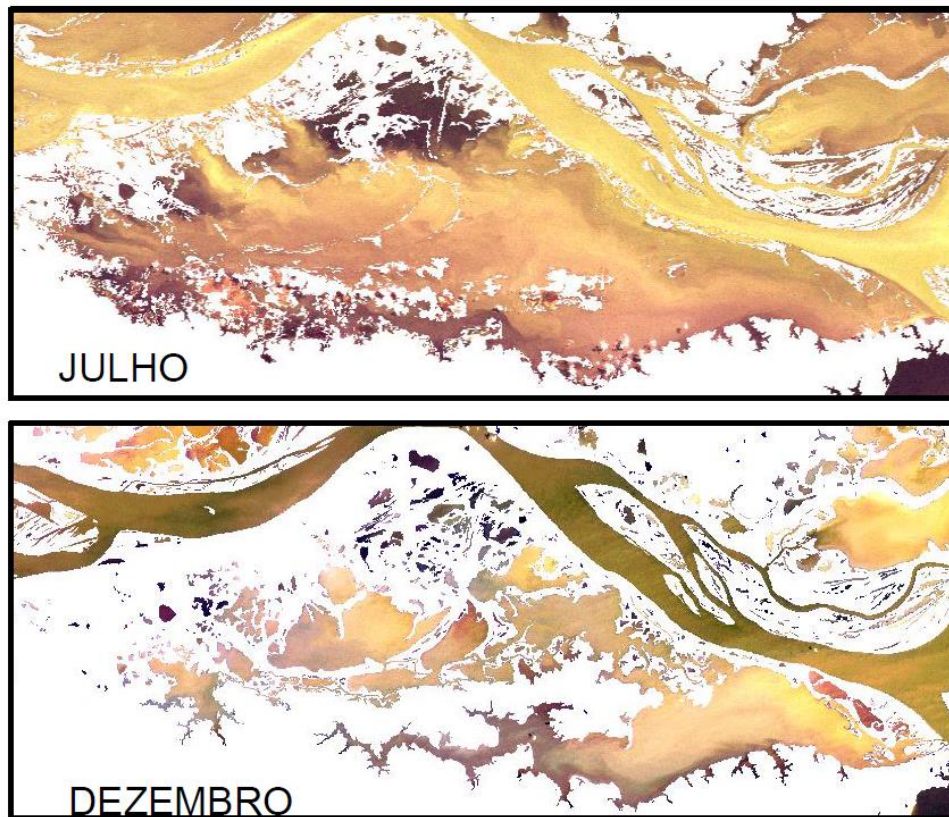
Figura 3 - Precipitação ocorrida em Óbidos de 2000 a 2015.



Fonte: INMET (Dados de precipitação da estação Meteorológica de Óbidos/PA).

A partir da imagem de julho, é possível vê-la como resultado das precipitações ilustradas na Figura 3. Devido à grande quantidade de chuvas entre os meses de fevereiro a maio, o rio Amazonas aumenta sua cota e permite que suas águas penetrem no lago em diversos locais simultaneamente. Além disso, neste período, a força da água e o intenso transporte de sedimentos resultam em aumento dos sólidos em suspensão (NOVO e KAMPEL, 2005). Em dezembro, por sua vez, a planície atinge sua cota mínima, resultado do período de baixa precipitação entre os meses de agosto a novembro. No mês de dezembro o nível da água do rio Amazonas diminui e é possível visualizar a divisão entre os lagos que compõem a planície (Figura 4). O Lago Grande do Curuai perde o contato direto com o rio Amazonas, devido à interrupção da entrada da água deste (RUDORFF et. al. 2014).

Figura 4 - Dinâmica da água da planície do Lago Grande do Curuai em função da variação da cota do Rio Amazonas.



Fonte: KAMPEL e NOVO (2005).

Esta característica de distribuição da água na planície é definida como monomodal, por possuir padrão de níveis máximos, de Maio a Julho, e mínimos, entre Outubro e Dezembro. Este padrão é definido não apenas pela precipitação na Bacia, como também pelas chuvas da região Andina, onde é localizada a nascente do Rio Amazonas. As águas oriundas do Andes é outro fator determinante das cotas na planície (BARBOSA, 2005).

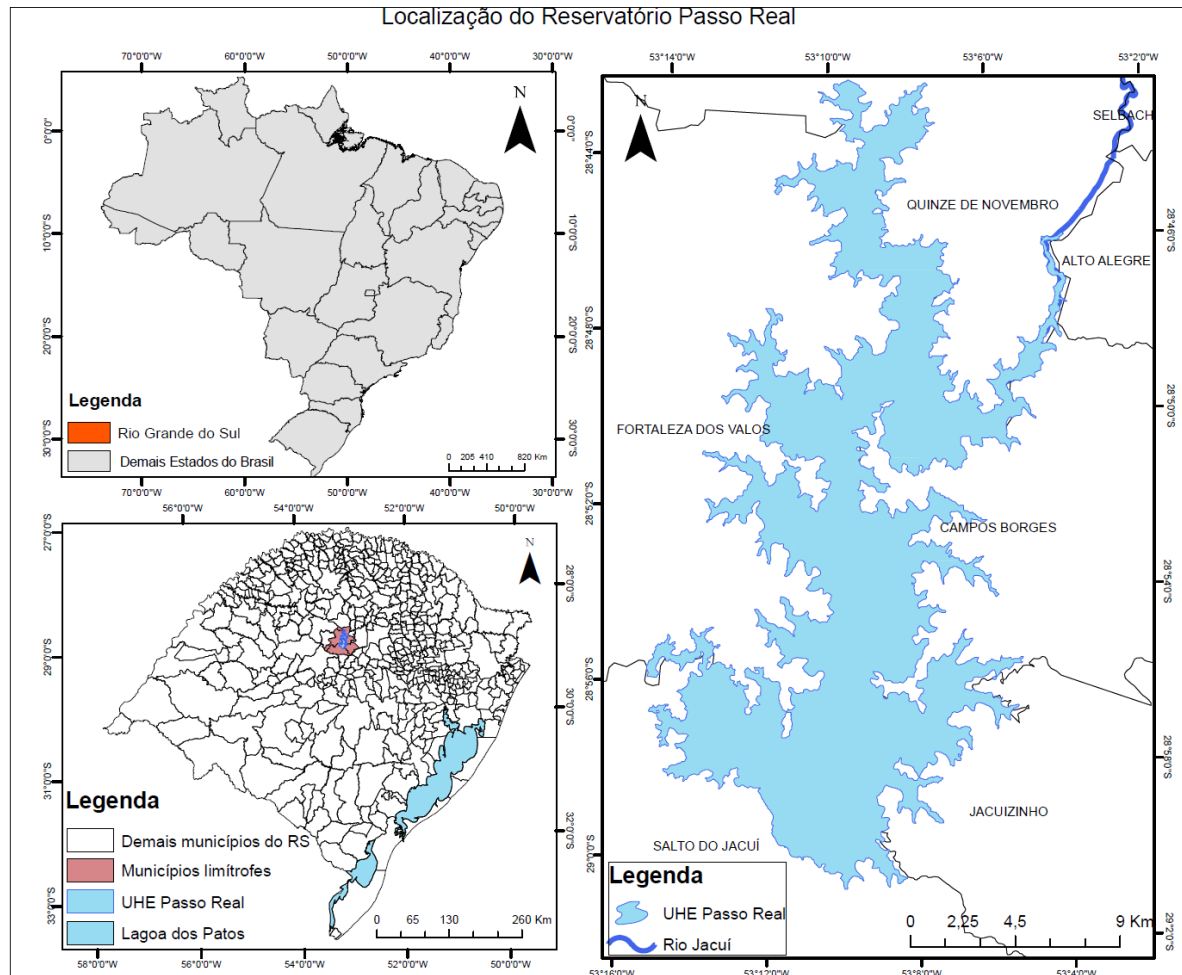
### 3.2 Reservatório Passo Real – RS

O reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Passo Real situa-se em uma das maiores bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul, a do Jacuí. É localizado ao centro-norte do estado e sua área alagada recebe águas dos rios Jacuí, Jacuí-Mirim e Ingaí (Figura 5).

A construção do reservatório Passo Real alagou 23.000 hectares de área e atingiu aproximadamente 1.600 propriedades rurais, atingindo sete municípios, sendo o mais afetado, o município de Fortaleza dos Valos, onde a área alcançou mais de 46% de alagamento. (CEEE – GT, 2009). O restante dos municípios alagados pelo reservatório são os de Salto do

Jacuí, Campos Borges, Quinze de Novembro, Selbach, Ibirubá e Alto Alegre, todos em proporções menores (Tabela 1).

Figura 5 - Localização da UHE Passo Real em relação ao Brasil e ao estado do Rio Grande do Sul.



Org.: BICCA, Illa  
Fonte: IBGE, 2010.

O município de Fortaleza dos Valos, onde se encontra a maior parte do reservatório (tabela 1), possui 4575 habitantes, segundo censo de 2010 e área de 650,365 km<sup>2</sup>, sendo sua densidade demográfica de 7,03 hab./km<sup>2</sup>. As atividades agrícolas principais são as culturas de soja, milho e trigo. Em relação à pecuária, a criação de gado bovino é predominante no Município.

O reservatório e a UHE Passo Real localiza-se sobre as rochas que preenchem a Bacia do Paraná. A geologia da região consiste em sucessivos derrames de lavas vulcânicas intermitentes com intercalação de rochas sedimentares. As rochas vulcânicas são de idade

mesozóica e pertencem à Formação Serra Geral e as rochas sedimentares, de idades paleozóicas e mesozóicas, pertencem à Formação Botucatu. (CEEE, 2011)

A usina foi inaugurada em 1973 como parte de um sistema de geração de eletricidade concedida pela CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica) e possui seis comportas. Além do reservatório Passo Real existem ainda os reservatórios de Jacuí, Itaúba e Dona Francisca, à jusante e o de Ernestina à montante.

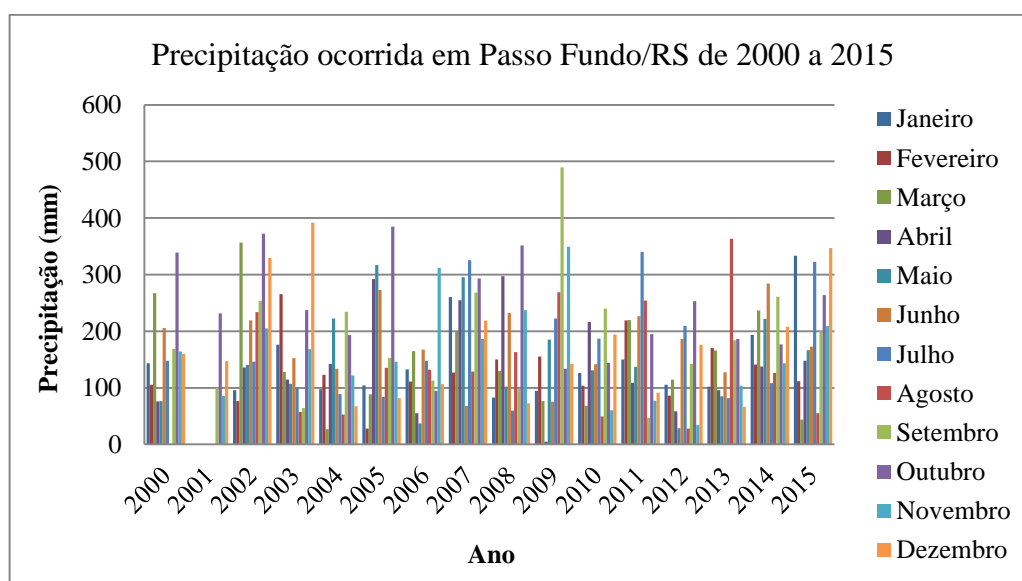
Tabela 1 - Municípios que foram alagados com a construção do reservatório Passo Real

<i>Municípios atingidos</i>	<i>Área alagada (%)</i>
Fortaleza dos Valos	46,52
Salto do Jacuí	21,18
Campos Borges	14,32
Quinze de Novembro	14,19
Ibirubá	2,06
Alto Alegre	1,10
Selbach	0,60

Fonte: Adaptado de Nota técnica – ONS (2006)

No que diz respeito à precipitação, a distribuição foi regular, ocorrendo maior precipitação, em sua maioria, nos meses de junho a setembro. No período de 2000 a 2009, a menor ocorrência de precipitação ocorreu nos anos de 2000, 2001 (devido a falta de dados) e 2009 (Figura 6).

Figura 6 - Precipitação em Passo Fundo de 2000 a 2015.



Fonte: INMET (Dados de precipitação da estação Meteorológica de Passo Fundo/RS)

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Limnologia

A palavra limnologia, em seu sentido etimológico, refere-se ao estudo dos lagos, pois é oriunda da palavra grega limné, que significa lago. As primeiras pesquisas foram realizadas, em sua maioria, em lagos na Suíça, berço da ciência Limnológica. Diante disso, tem-se a limnologia como o “estudo ecológico de todas as massas d’água continentais, independente de suas origens, dimensões e concentrações salinas” (ESTEVES, 1998). Um dos principais objetivos da limnologia é fornecer orientações para a gestão da água e controle da poluição hídrica e estudar maneiras de proteger a fauna de lagos e rios. Para isto são verificadas suas variáveis limnológicas, que estão diretamente ligadas à qualidade hídrica. Dentre as principais estão a temperatura (C°); condutividade elétrica, que é capacidade desta em conduzir a corrente elétrica e ocorre em função da concentração dos íons presentes na solução (ESTEVES, 1998); a cor, que está ligada aos compostos existentes, podendo estes ser orgânicos e inorgânicos; pH (potencial Hidrogeniônico), que reflete, na maioria das vezes, o tipo de solo que a água percorreu e é quantificada em uma escala de 0 a 14, variando entre pH ácido (de 7 a 0) e pH básico (7 a 14) (PORTAL AMBIENTE BRASIL, 2014); clorofila (ug/l), utilizada para expressar a biomassa fitoplanctônica e pode detectar possíveis alterações na qualidade da água, pois está diretamente relacionada com a quantidade de algas presentes no manancial, sólidos dissolvidos (mg/L), provenientes, principalmente, da dissolução das rochas e solos, matéria orgânica dissolvida e o Total de sólidos em suspensão, que compreende os sólidos orgânicos e inorgânicos em suspensão transportados pela água. (TODESCHINI, 2004). Diante disso, tem-se na limnologia uma ciência de grande alcance social, uma vez que fornece diversos subsídios para a conservação, recuperação e manejo dos ecossistemas aquáticos continentais.

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

Uma das variáveis limnológicas que mais influencia a resposta do espectro eletromagnético é o TSS, pois este possui partículas que causam o espalhamento da energia incidente na água e também é o principal responsável pelo retroespalhamento da radiação. Além disso, o TSS está diretamente ligado com a turbidez da água, uma vez que os valores desta crescem conforme o aumento dos sólidos em suspensão. Diante disso, a turbidez possui

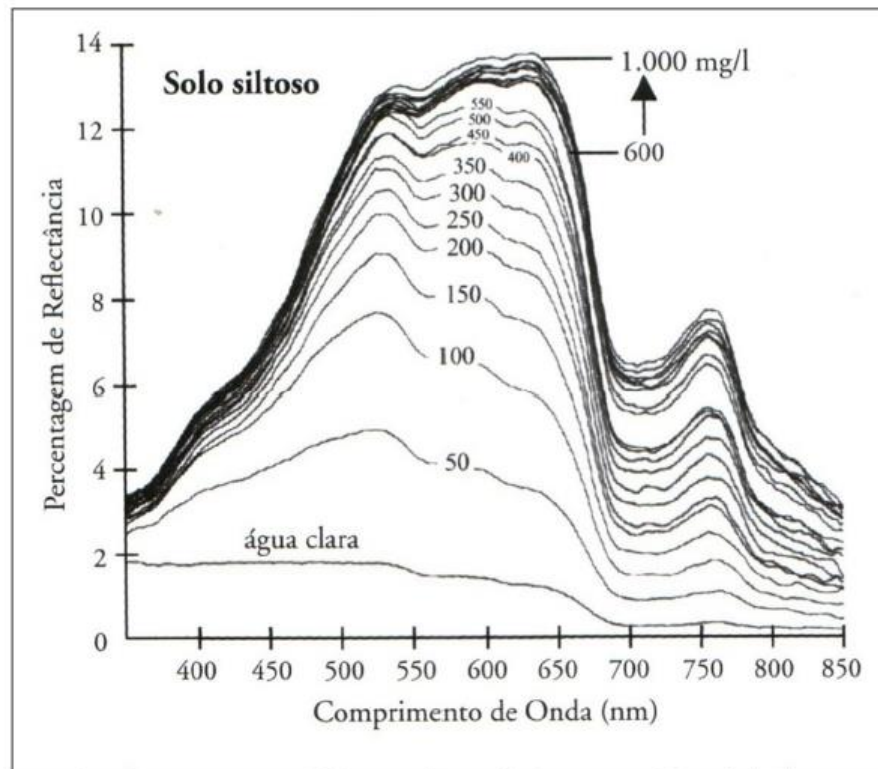


uma relação com o espalhamento e retroespalhamento, podendo ser considerada um espalhamento lateral. (ESTEVEZ, 1998); (WACHHOLZ, 2011).

O TSS é dividido em dois tipos, os sólidos orgânicos em suspensão (SOS) e inorgânicos (SIS). O SOS é composto em sua maioria por fitoplâncton, material orgânico decomposto oriundo de florestas e outras partículas orgânicas, enquanto o SIS é constituído por partículas minerais, principalmente, silte e argila (ESTEVEZ, 1998); (TODESCHINI, 2004); (KIRK, 2011).

A Figura 7 mostra um gráfico onde é possível comparar as reflectâncias provenientes da água clara (pura) e da água em diferentes concentrações de TSS de um solo siltoso. Nota-se que a água clara possui maior reflectância na região do azul e início do verde, embora apresente baixos níveis de reflectância se relacionado com a água oriunda de solo siltoso. Isso ocorre porque a água absorve a radiação, enquanto que uma massa de água que contém componentes opticamente ativos espalha a radiação em praticamente toda a região do visível, e um pouco no início do infravermelho próximo. Posteriormente há uma queda da reflectância em 650 nm, devido ao aumento da absorção da radiação pela água na faixa do vermelho e um leve aumento em 750, na faixa do infravermelho próximo.

Figura 7 - Medidas de reflectância da água clara e de água com diferentes concentração de sólidos em suspensão de solo siltoso



Fonte: JENSEN (2009)

## 4.2 Sensoriamento Remoto da água

As geotecnologias estão cada vez mais inseridas nos estudos de cunho ambiental, servindo de suporte para análises e monitoramento da superfície terrestre para diversos objetivos. O sensoriamento remoto, assim como os sistemas de informação geográfica foram uma revolução nas pesquisas do meio ambiente por permitirem um maior controle, tanto do espaço natural, quanto do espaço transformado pelo ser humano.

O sensoriamento remoto, segundo NOVO (2010), consiste no uso de sensores para a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles. Por isso sua importância, uma vez que permite o estudo de áreas em escala grandes e pequenas, dependendo da resolução espacial de cada sensor. MENESES e ALMEIDA (2012), por sua vez, definem o sensoriamento remoto como uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres.

Esta tecnologia é uma valiosa ferramenta para os estudos ambientais, uma vez que possibilita o reconhecimento dos elementos presentes na superfície terrestre a partir da interação da radiação eletromagnética com estes elementos, onde cada alvo/elemento possui sua resposta espectral característica, resultado da sua interação, em diferentes comprimentos de onda, com a radiação eletromagnética incidente. Com o valor do comprimento de onda obtido é possível concluir em qual banda do visível e/ou infravermelho próximo o alvo em questão reflete maior energia. Porém não é apenas a energia refletida que é considerada no sensoriamento remoto. A absorção de energia e a transmitância, que compreende na capacidade de determinado alvo transmitir energia, são muito importantes para as pesquisas em sensoriamento, uma vez que estes termos se completam. Exemplificando, se um determinado alvo possuir aspecto escuro, sua reflectância, que consiste na razão entre a radiação refletida pela radiação incidente, terá um valor baixo, devido a maior absorção pelo alvo e menor espalhamento/retroespalhamento.

No caso da água, o sensoriamento remoto é muito utilizado para monitoramento e controle ambiental e se apresenta de forma diferente em relação a outros tipos de alvos naturais. Além disso, a água se apresenta de forma mais dinâmica, se comparado a outros alvos como a vegetação e o solo, pois a interação entre a energia e alvos aquáticos sofre interferências. Diante disso, a reflectância não ultrapassa os 20%, o que resulta em baixa radiância captada pelo sensor, sendo que 85 a 90% compreendem os processos ocorridos ainda na atmosfera. Diante disso, apenas 10 a 15% do sinal captado pelo sensor trazem



informações sobre o corpo de água, e apenas uma pequena fração desta porcentagem tem relação à superfície da água (BARBOSA, 2005).

#### 4.2.1 Propriedades óticas da água

Presentes na água, tanto doce quanto salina, a mistura de diversas partículas e materiais dissolvidos ou em suspensão afetam diretamente a radiação recebida e, conseqüentemente, suas respostas espectrais. Alguns destes materiais interagem com a radiação incidente, modificando as respostas espectrais e conseqüentemente a cor da água, e por isto são denominadas de opticamente ativos. Os principais componentes que modificam a resposta espectral da água pura são a matéria orgânica dissolvida, sólidos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes (KIRK, 2011).

As propriedades óticas da água são discriminadas em dois tipos: propriedades óticas inerentes e aparentes. As propriedades inerentes são aquelas que dependem do meio em que estão inseridas, uma vez que estão relacionadas diretamente com a concentração das substâncias suspensas e dissolvidas existentes na coluna d'água. Ao mesmo tempo em que dependem do meio em que se encontram, as propriedades óticas inerentes independem do campo de luz incidente, ou seja, não são influenciadas por mudanças na distribuição angular do fluxo radiante (KIRK, 2011). As principais propriedades óticas inerentes são o coeficiente de absorção, coeficiente de espalhamento e a função de espalhamento volumétrico.

##### 4.2.1.1 Propriedades óticas Aparentes

As propriedades óticas aparentes, segundo MOBLEY (1994), são dependentes das propriedades óticas inerentes e do campo de luz ambiente, ou seja, depende tanto do meio quanto estrutura do campo de luz. As propriedades óticas aparentes são o coeficiente de atenuação difusa, reflectância de irradiância espectral (também chamado de razão de irradiância),  $R(\lambda)$  e a reflectância de Sensoriamento Remoto ( $R_{rs}$ ).

*Razão de irradiância  $R(\lambda)$*  - A razão de irradiância é expressa a partir de uma equação que representa a razão entre a irradiância ascendente  $E_u(\lambda)$  e a irradiância descendente  $E_d(\lambda)$ , sendo estas consideradas logo abaixo da superfície da água.

$$R(\lambda) = \frac{E_u(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (1)$$

*Reflectância de Sensoriamento Remoto*  $R_{sr}$  – Esta medida define a fração da luz que atinge a superfície e penetra na coluna da água que retorna para a atmosfera em uma certa direção  $(\theta, \Phi)$ . Onde  $\theta$  é o ângulo de incidência e  $\Phi$  o fluxo radiante. É definida como a razão entre a radiância ascendente e a irradiância descendente (KIRK, 2011).

$$R_{sr}(\theta, \Phi; \lambda) = \frac{L_{\theta, \Phi}}{E_d} \quad (2)$$

Na equação da reflectância de sensoriamento remoto tem-se a razão entre a radiância  $(L_{\theta, \Phi})$  na direção  $\theta, \Phi$  e a irradiância descendente  $(E_d)$  que são medidas acima da água.

As propriedades ópticas inerentes e aparentes são indispensáveis para o estudo dos corpos d'água no âmbito do sensoriamento remoto, uma vez que torna possível conhecer a relação da luz com a coluna d'água, bem como a interação da energia radiante com as partículas existentes na água para, assim, determinar as concentrações de determinado corpo d'água.

### 4.3 Análise dos espectros de reflectância

Para análise dos espectros de reflectância, de cada área de estudo, foram realizadas técnicas estatísticas para determinar a influência do total de sólidos em suspensão na resposta espectral nos pontos coletados in loco. Um dos meios utilizados para apurar a relação entre a reflectância e a variável de sólidos em suspensão foi a correlação, que constata se existe um grau de correlação entre elas. O coeficiente de correlação varia de -1 e +1. Valores negativos indicam correlação inversa, quando x aumenta e o y diminui (ou vice-versa). A correlação positiva significa que as variáveis x e y variam no mesmo sentido. No gráfico de dispersão, o valor máximo (-1 ou +1) apresenta-se como uma linha reta inclinada e quando não há correlação é apresentada no gráfico uma nuvem irregular (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

No caso dos dados de reflectância de Sensoriamento remoto, relacionados com a variável TSS, quanto maior o valor da correlação, maior será a relação entre a variável e a resposta espectral.

#### 4.3.1 Análise derivativa

Uma das técnicas estatísticas mais utilizadas para análise das respostas espectrais de diferentes alvos é a análise derivativa que realça as feições com maior taxa de variação em relação ao comprimento de onda no espectro. A análise derivativa geralmente é realizada em primeira e segunda ordem, dependendo dos objetivos da análise. A primeira derivada tende a remover sinais da água e apontar maiores variações de reflectância na assinatura espectral, uma vez que relaciona a reflectância ( $R\lambda$ ) com o comprimento de onda ( $\lambda$ ), o que facilita a detecção de sólidos em suspensão. Por outro lado, a derivada de segunda ordem é comumente utilizada para estudos relacionados à clorofila, pois tende a remover os efeitos dos sólidos em suspensão GOODIN (1993); RUNDQUIST (1996).

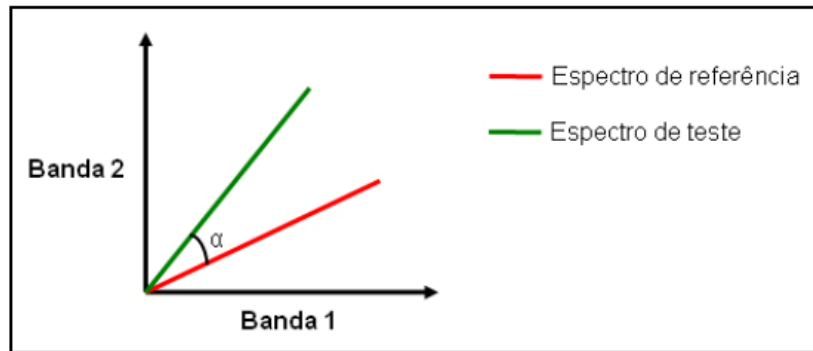
##### 4.3.1.1 Regressão Linear

Uma importante análise estatística, muito utilizada para geração de modelos empíricos para estimar dados limnológicos é a Regressão Linear, que considera a relação e a variação entre as variáveis, a partir de uma função linear dada por  $y = a + bx$ , sendo o  $x$  a variável independente e o  $y$ , a variável dependente (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

#### 4.4 Spectral Angle Mapper (SAM)

O Mapeamento por ângulo espectral compreende em uma técnica utilizada para determinar o grau de similaridade entre curvas espectrais captadas por sensores com grande número de bandas, ou entre curvas de referência disponíveis em uma biblioteca espectral (KRUSE et al., 1993); (BARBOSA, 2005). Este algoritmo de classificação supervisionada determina a similaridade entre dois espectros a partir do cálculo do ângulo formado entre eles, tratando-os como vetores em um espaço de dimensão correspondente ao número de bandas. Portanto, quanto menor o ângulo determinado entre os dois espectros, maior será a similaridade entre eles (Figura 8). Outra consideração importante cerca do uso deste algoritmo é que ele não leva em consideração a amplitude dos espectros e sim sua forma.

Figura 8 – Esquema explicativo da ferramenta SAM



Fonte: Adaptado de KRUSE (1993).

A técnica SAM determina a similaridade de um espectro de teste para um espectro de referência pela aplicação da seguinte equação (KRUSE et al, 1993):

$$\cos^{-1} \left( \frac{\vec{t} \cdot \vec{r}}{\|\vec{t}\| \cdot \|\vec{r}\|} \right); \quad \text{Ou ainda} \quad \cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left( \sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{1/2}} \right); \quad (3)$$

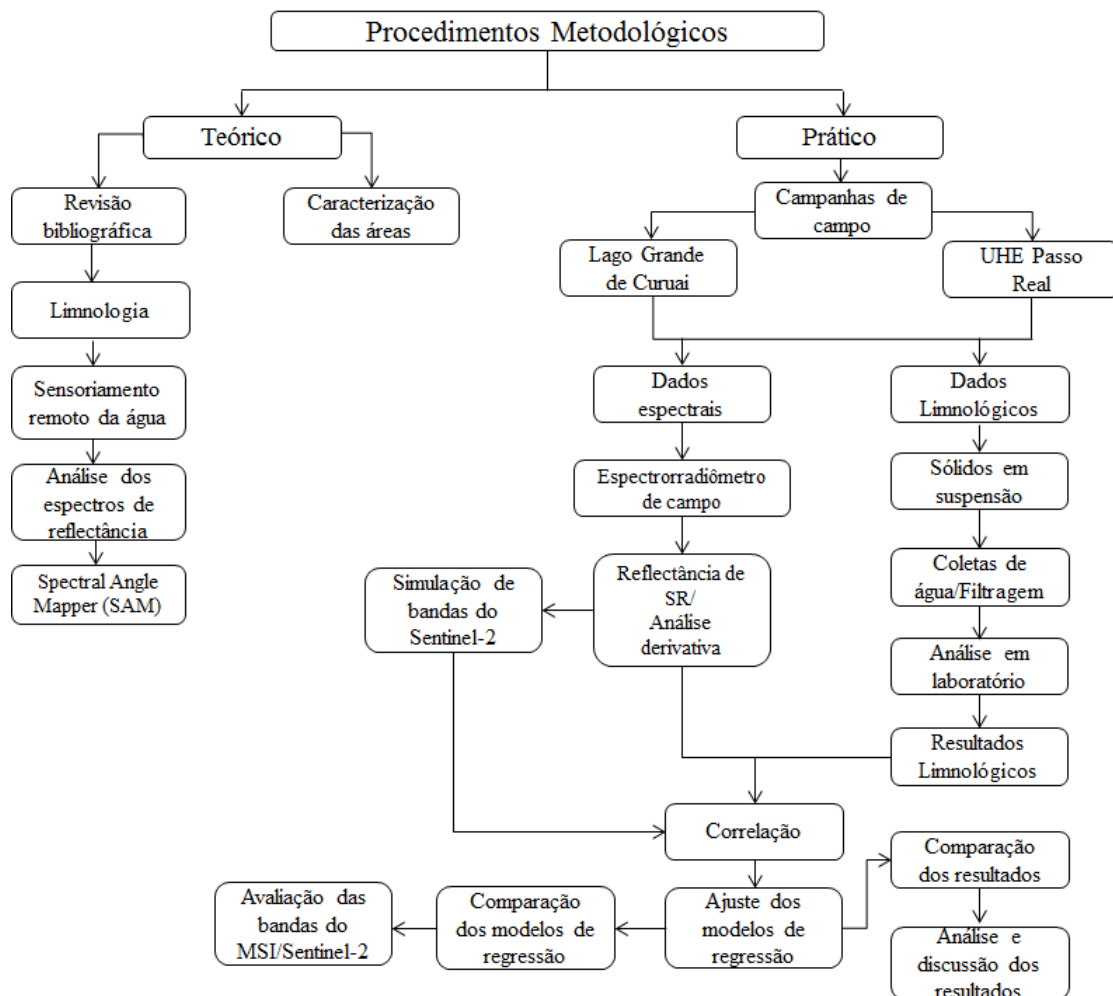
Onde  $nb$  é o número de bandas;  $t$  o espectro em teste;  $r$  o espectro de referência.

Há diversos estudos que utilizam o SAM, em sua grande maioria, estudos mineralógicos, para identificação de minerais, bem como de vegetação, a partir de bibliotecas espectrais existentes. Quanto aos estudos de corpos d'água, não há uma biblioteca espectral extensa como as existentes no campo da mineralogia e ainda há poucas pesquisas que se utilizam do SAM na comparação de espectros, neste âmbito. Entre os poucos estudos estão o de VALÉRIO et. al. (2009), que realizou agrupamento de espectros em função da concentração de matéria orgânica e TSS no reservatório de Manso – MT, no qual obteve resultados satisfatórios; LOBO (2009) que construiu uma biblioteca espectral de referência para caracterizar diferentes tipos de água das áreas alagáveis da Amazônia, utilizando o SAM para definir curvas de referência e GALO e CICERELLI (2015) que analisaram a variação sazonal da concentração de Chl-a em um reservatório paulista, utilizando-se da técnica SAM para agrupar espectros a partir da concentração de Chl-a.

## 5 METODOLOGIA

A pesquisa foi dividida em uma etapa teórica e outra prática, onde a primeira foi composta por revisões bibliográficas e caracterização das áreas e a segunda pelas campanhas de campo e as análises dos dados e espectros (Figura 9). Esta pesquisa contou com duas campanhas de campo nas respectivas áreas de estudo, sendo uma realizada em 10 de Junho de 2016, na UHE Passo Real e outra no mês de julho de 2016, mais precisamente entre os dias 11 a 22, na Planície do Lago Grande do Curuai, em um período que o nível da água alcança uma alta cota de inundação. Para medir as reflectâncias em seus respectivos comprimentos de onda foram utilizados espectro-radiômetros de campo e sensores que permitem a medida de espectros de reflectância para análise.

Figura 9 - Organograma dos procedimentos metodológicos



## 5.1 Equipamentos utilizados

Dois espectro radiômetros foram utilizados durante as medidas radiométricas nas duas áreas de estudo. Na campanha de campo na planície do Lago Grande do Curuai, foi utilizado o sistema *Ramses TriOs*, e no reservatório Passo Real foi utilizado o espectro radiômetro *Fieldspec*<sup>®</sup> *HandHeld*.

### 5.1.1 Ramses TriOs<sup>®</sup>

O sistema *Ramses TriOs* (Figura 10), que possui módulos para medir a radiância e irradiância em comprimentos de onda nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo (320 a 950 nm), sendo sua resolução espectral de 3 nm, com tempo de resposta de até 10 segundos e tempo de medição de até 8 segundos. Além disso, o equipamento em questão é modular, permitindo que até seis sensores sejam utilizados simultaneamente e possam realizar medidas acima da água e na coluna d'água ao mesmo tempo. Estes módulos são o Ramses ACC, equipado com coletor cosseno e com sensores de inclinação e pressão; e o módulo Ramses ARC, por sua vez, possui coletor com ângulo sólido de 7 graus.

Figura 10 – Espectro radiômetro Ramses TriOS



Fonte: <http://www.trios.de>

### 5.1.2 Espectro radiômetro *Fieldspec*<sup>®</sup> *HandHeld*

Outro sensor utilizado para medir as reflectâncias é o espectro radiômetro *Fieldspec*<sup>®</sup> *HandHeld* (Figura 11), sensor portátil que possui faixa de operação entre 325 e 1075 nm, do ultravioleta ao infravermelho próximo e resolução espectral de 1 nm e ângulo sólido de 25° (ASD, 2002).

Figura 11 - Espectro-radiômetro de campo FieldSpec HandHeld



Fonte: [www.asdi.com](http://www.asdi.com)

Este espectro radiômetro de campo é calibrado a partir de uma superfície Lambertiana, que compreende em uma placa de referência (*spectralon*) branca e de superfície lisa. Após o processo de calibração é realizada a otimização para, posteriormente, ser iniciada a coleta dos dados espectrais em cada ponto, onde são realizadas as leituras, conforme a configuração escolhida, para diminuir os efeitos do movimento da superfície da água.

## 5.2 Simulação de bandas centrais do Sentinel-2

Sentinel-2 é uma missão europeia composta por satélites gêmeos que orbitam na Terra em 180°, permitindo maior cobertura e frequência de revisita de cinco dias. Foi lançada pela Agência Espacial Europeia, em conjunto com outros segmentos europeus, com o objetivo de fornecer imagens multiespectrais de alta resolução de grandes áreas, como continuidade das fornecidas pelas séries SPOT e LANDSAT. Possui 13 bandas espectrais, com largura de faixa de 290Km e fornece dados para observação da Terra, realizando coleta de dados sobre a vegetação, solos, rios e áreas costeiras, além de dados para correção atmosférica (absorção e distorção) em resolução de 10 m (ESA, 2016) .

A partir destas atribuições, foi realizada a simulação de bandas do sensor Sentinel 2 a partir das reflectâncias medidas em campo no Lago Grande do Curuai e Passo Real. Para isto, primeiramente, foi preciso saber corretamente o comprimento de onda de cada banda do sensor. As bandas centrais, visualizadas na tabela 2, foram isoladas em um espectro, com suas reflectâncias correspondentes em cada ponto.

Tabela 2 - Bandas centrais do Sentinel 2

Bandas do MSI (resolução espacial)	Banda Central (nm)	Largura de banda (nm)	Radiância de referência Lref ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )
Banda 1 (60 m)	443 (azul)	20	129
Banda 2 (10 m)	490 (azul)	65	128
Banda 3 (10 m)	560 (verde)	35	128
Banda 4 (10 m)	665 (vermelho)	30	108
Banda 5 (20 m)	705 (vermelho)	15	74,5
Banda 6 (20 m)	740 (vermelho)	15	68
Banda 7 (20 m)	783 (vermelho)	20	67
Banda 8 (10 m)	842 (NIR)	115	103
Banda 8A (20 m)	865 (NIR)	20	52,5
Banda 9 (20 m)	945 (NIR)	20	9
Banda 10 (60 m)	1375 (SWIR)	30	6
Banda 11 (20 m)	1610 (SWIR)	90	4
Banda 12 (20 m)	2190 (SWIR)	180	1,5

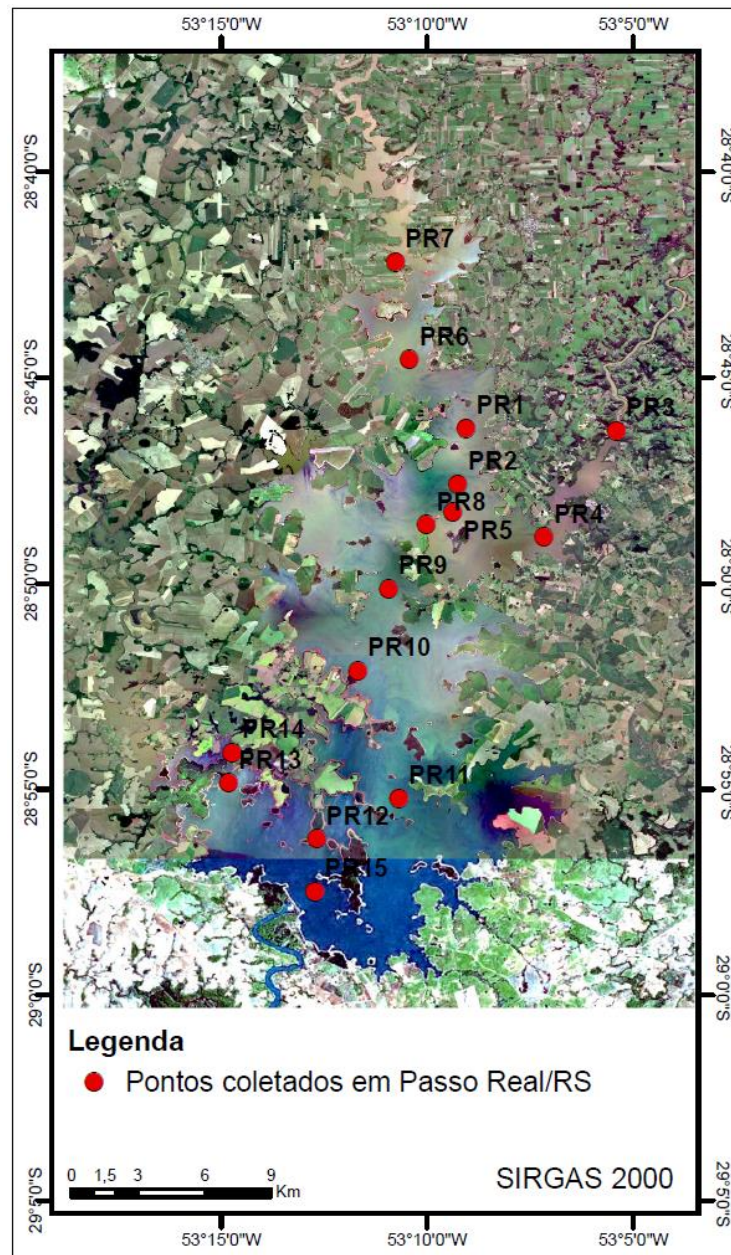
Fonte: Adaptado de earth.esa.int

### 5.3 Pontos coletados na UHE Passo Real

Na campanha de campo realizada em 10 de junho de 2016, na UHE Passo Real, foram obtidos 15 pontos (Figura 12), onde foram coletadas amostras de água para determinação das concentrações de TSS, além de temperatura, cor, profundidade (Secchi), clorofila e turbidez. Foram utilizados filtros de  $0,7\mu\text{m}$  para a filtragem da água e, posteriormente, encaminhada para o laboratório.



Figura 12 - Imagem do reservatório e os pontos amostrais adotados.



Fonte: Google Earth

É possível visualizar, pela cor da água na imagem, maior presença de sedimentos na porção norte e nordeste do reservatório, principalmente nos pontos amostrais 1, 2, 3, 4 e 5. No quadro 2 encontram-se as concentrações de TSS e seus respectivos pontos amostrais, onde se pode notar o contraste quanto à concentração de sedimentos.

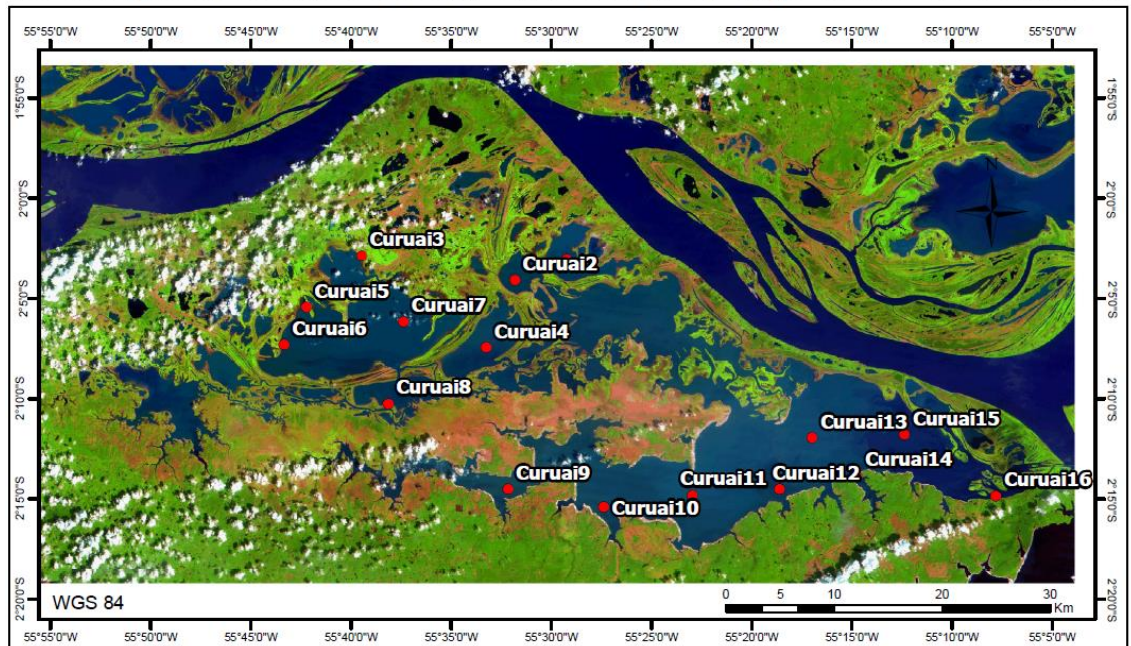
#### 5.4 Pontos coletados na Planície do Lago Grande do Curuai

Na campanha de campo realizada entre os dias 11 e 22 de julho na planície do Lago Grande do Curuai, foram adotados 16 pontos para o levantamento de informações

radiométricas com a utilização dos espectro radiômetros e de coleta de água para análise em laboratório (Figura 13) de clorofila, TSS, DOC. Nos pontos de coleta foram levantadas informações como dia, velocidade do vento, altitude, condição do céu (presença de nuvens) e localização geográfica a partir de GPS.

Figura 13 - Pontos de coleta

**Localização dos Pontos coletados na Planície do Lago Grande de Curuai - PA**



A disposição dos pontos na planície se deu a partir de trabalhos anteriores desenvolvidos por BARBOSA (2005), com objetivo de monitorar o corpo d'água. Para isto a localização dos pontos continua constante para melhor análise da dinâmica da planície.

O sensor realizou entre 180 e 350 leituras em cada comprimento de onda e em cada ponto, a fim de garantir maior precisão dos resultados (Figura 14).

Figura 14 - Sensores TriOs acima da água e em subsuperfície



Fonte: Acervo de campo

O pós-processamento dos dados foi realizado com a utilização de um aplicativo de edição e análise estatística, o MATLAB, desenvolvido Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (LANBISA)<sup>1</sup>, localizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), onde foram reduzidas entre 15 e 30 leituras mais estáveis por ponto. Este procedimento teve como objetivo descartar medidas afetadas por efeito de Glint, vento, passagem de nuvens e etc e utilizar apenas as leituras que contenham comportamento semelhante. Além disso, o aplicativo permitiu a normalização das reflectâncias, na qual um valor de irradiância é escolhido como referência para outras médias, uma vez que esta oscila devido à variação da quantidade de energia incidente. A normalização acaba por anular a hipótese de que o valor da medida mudou devido à quantidade de energia que chegou. A mudança dos valores, portanto, ocorrerá por outros fatores.

Concluída a etapa de correções, foram determinadas as medianas das reflectâncias em cada ponto a fim de garantir que cada ponto houvesse apenas um resultado de reflectância por comprimento de onda.

#### 5.4.1 Total de sólidos em suspensão

As amostras de água foram coletadas e filtradas em campo (Figura 15), com a utilização de filtros de poro de  $0,7\mu\text{m}$  (Figura 16), e filtrando entre 100 e 350 ml em função dos sedimentos presentes na coluna d'água. As amostras foram feitas duplicadas, o que resultou em variáveis quantificadas a partir da média entre estas análises.

---

<sup>1</sup> <http://www.dpi.inpe.br/labisa/>

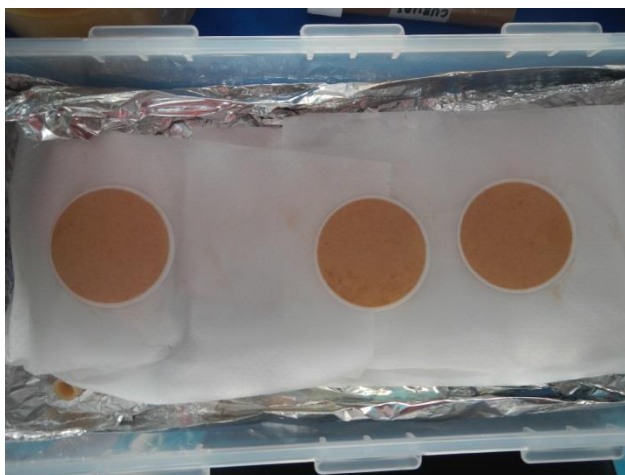


Figura 15 - Estação de trabalho para filtragem das amostras.



Fonte: Acervo da autora

Figura 16 - Filtros



Com o término das campanhas de Campo e das análises de laboratório das amostras de água, em relação ao TSS, nas duas áreas de estudo, partiu-se para a análise dos espectros gerados a partir dos dados espectrais. Após agrupar os espectros de acordo com suas formas, a fim de conhecer e analisar suas assinaturas espectrais separadamente, os espectros foram relacionados com os dados de TSS, a partir da geração de modelos empíricos que permitem quantificar a relação entre as assinaturas espectrais e a concentração de TSS nos pontos amostrais.

## 5.5 Geração de Padrões espectrais

Para melhor análise dos espectros de reflectância, os mesmos foram discriminados três grupos de acordo com a semelhança de suas assinaturas espectrais utilizando-se do algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper), implementado no MATLAB, a partir da técnica de classificação k-media. Neste caso, o classificador k-media utilizou a distância mínima entre os espectros, estimada pelo algoritmo SAM, como medida de similaridade entre espectros (BARBOSA, 2005). Vale ressaltar que nesta pesquisa foi escolhido para cada classe inicial um espectro aleatório, como centroide da classe. Este centroide serve como espectro de referencia a ser comparado com os demais espectros para, a partir da menor distância do centroide de referência e os outros espectros, alocar cada espectro a uma determinada classe. Após o primeiro agrupamento de classes um novo centroide é calculado a partir da média dos espectros de cada classe. Este novo centroide serve como referência para o reagrupamento, que deverá ser repetido até que nenhum espectro mude de classe.

## 6 RESULTADOS OBTIDOS

### 6.1 UHE Passo Real

As campanhas de campo em Passo Real, resultaram em 15 pontos amostrais com concentração de TSS variando entre 2 e 12 mg/L. As concentrações de chl-a por sua vez apresentaram valores maiores, de 5,05 a 46,98 µg/L (Quadro 2).

Quadro 2 - Concentração de TSS nos pontos amostrais de Passo Real

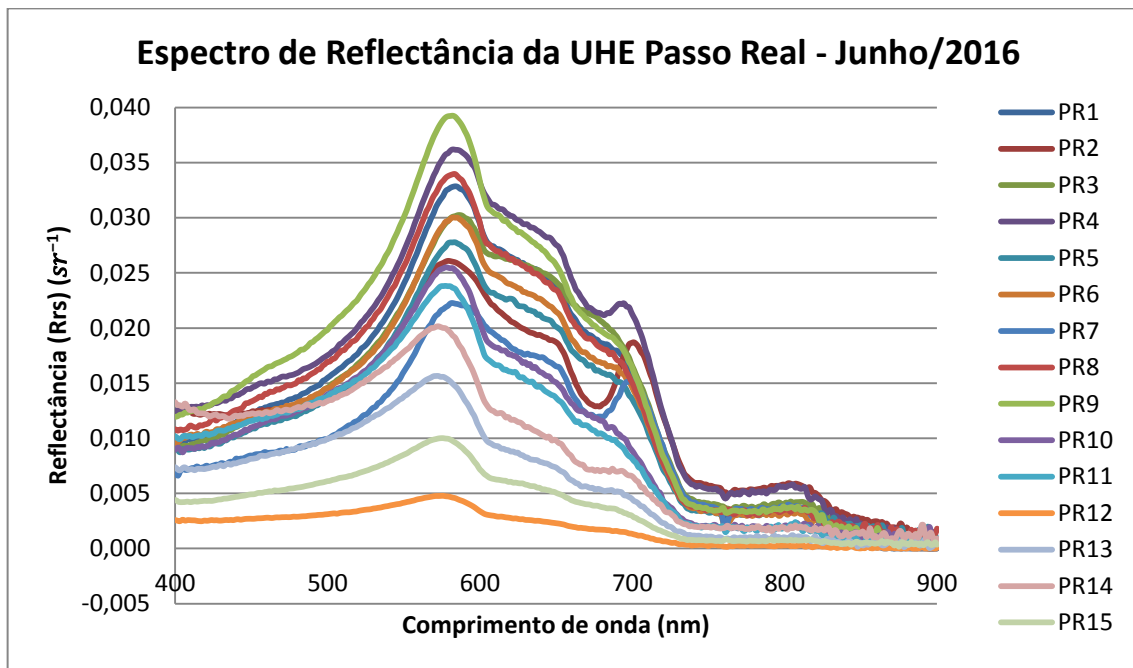
Ponto TSS (mg/L)	PR1	PR2	PR3	PR4	PR5	PR6	PR7
	12	8	7	9	3	8	11
PR8	PR9	PR10	PR11	PR12	PR13	PR14	PR15
3	7	4	2	7	5	3	2

Ponto Chl-a (µg/L)	PR1	PR2	PR3	PR4	PR5	PR6	PR7
	13,64	46,9836	3,536	23,239	8,083	11,114	46,984
PR8	PR9	PR10	PR11	PR12	PR13	PR14	PR15
9,094	7,578	7,758	5,557	5,7256	11,62	14,145	5,052

### 6.2 Espectro de reflectância de Passo Real – RS

O espectro de reflectância de Passo Real resultou da média de dez leituras em cada ponto amostral obtidos com o espectro radiômetro Hand Held (Figura 17).

Figura 17 - Espectro de Reflectância da UHE Passo Real



### 6.3 Lago Grande do Curuai

Foram obtidos 16 pontos amostrais na campanha de campo, contendo concentrações de TSS variando entre 18,75 e 49,66 mg/L. As concentrações de Chl-a variaram de 6,41 a 72,6 µg/L (Quadro 3).

Quadro 3 - Concentração de TSS em cada ponto amostral

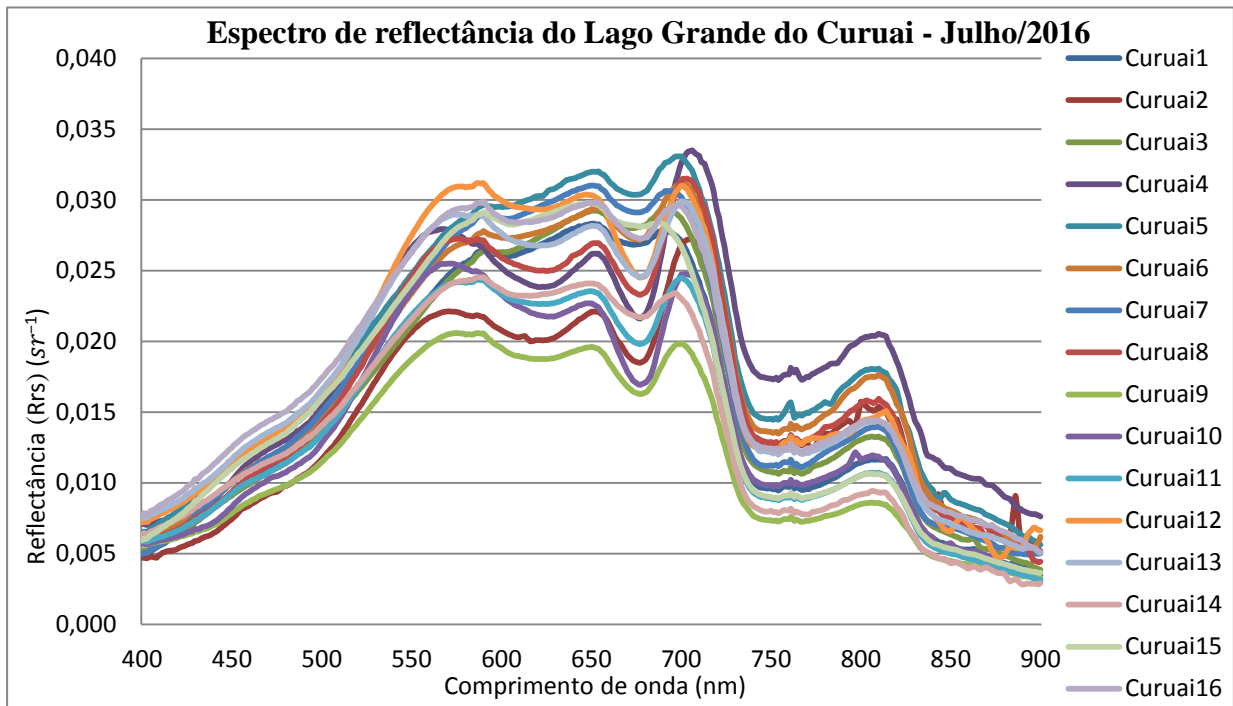
Ponto TSS (mg/L)	Curuai1	Curuai2	Curuai3	Curuai4	Curuai5	Curuai6	Curuai7	Curuai8
	26,334	38,8	29,857	45	44,143	49,667	24	45,834
Ponto TSS (mg/L)	Curuai9	Curuai10	Curuai11	Curuai12	Curuai13	Curuai14	Curuai15	Curuai16
	21,429	25,572	23,715	34,134	33,5	32,75	18,75	41,5

Ponto Chl-a (µg/L)	Curuai1	Curuai2	Curuai3	Curuai4	Curuai5	Curuai6	Curuai7	Curuai8
	6,720	85,050	6,410	21,670	11,050	24,580	9,010	72,600
Ponto Chl-a (µg/L)	Curuai9	Curuai10	Curuai11	Curuai12	Curuai13	Curuai14	Curuai15	Curuai16
	41,650	31,660	30,600	57,360	35,850	10,260	5,250	25,5

### 6.4 Espectro de reflectância do Lago Grande do Curuai - PA

Concluída as correções nas reflectâncias com o uso do aplicativo MATLAB, resultantes da campanha de campo, partiu-se para a geração do espectro representativo de cada ponto de coleta (Figura 18) a partir das medianas do conjunto de reflectâncias em cada ponto coletado.

Figura 18 - Espectro de reflectância de sensoriamento remoto medidos no Lago Grande do Curuai

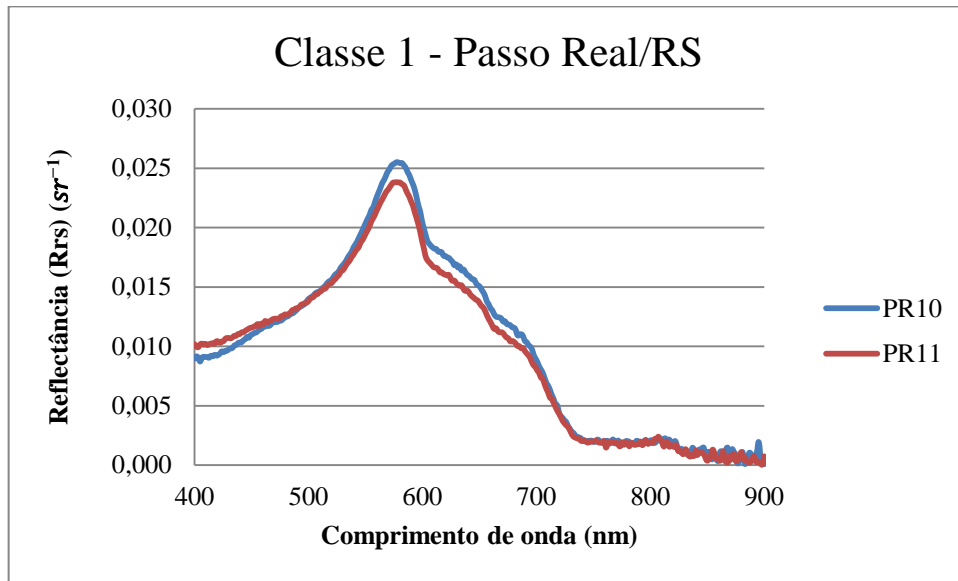


#### 6.4.1 Padrões Espectrais de Passo Real – RS

Para a geração de espectros em Passo Real, primeiramente foi realizada uma transformação das radiâncias obtidas com o Hand Held para irradiância, ou seja, a variável foi transformada de uma reflectância bidimensional para reflectância de sensoriamento remoto a partir da divisão das reflectâncias por  $\pi$  ( $\pi = 3,14$ ). Esta transformação foi indispensável para a comparação dos padrões espectrais nas duas áreas de estudo, uma vez que mantém as reflectâncias com a mesma variável, o que possibilita uma análise comparativa.



Figura 19 - Primeira classe de agrupamento de espectros

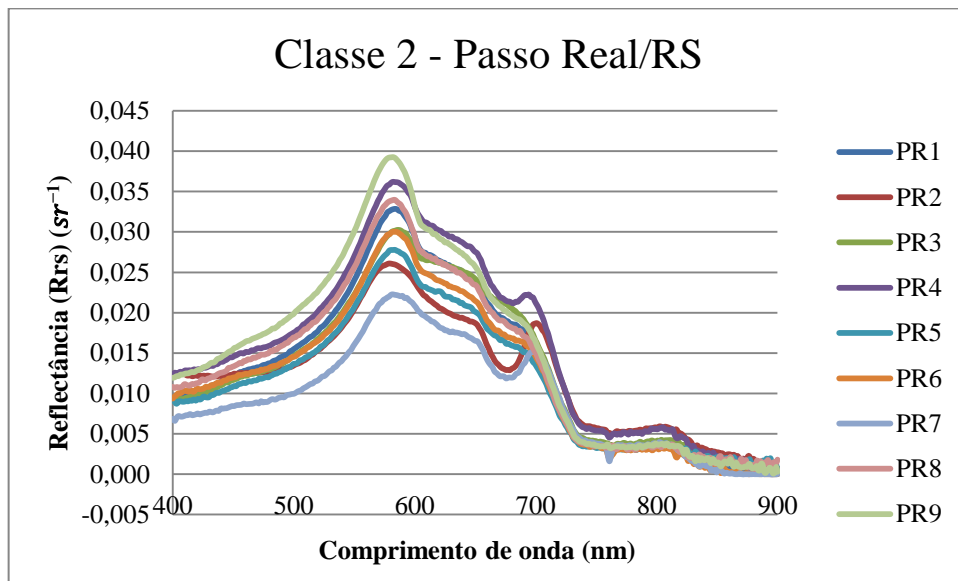


A primeira classe de agrupamento de Passo Real (Figura 19) corresponde a dois espectros de reflectância referentes às amostras PR10 e PR11, os quais apresentam assinaturas semelhantes, com pico de reflectância em 570 nm, na região do verde, e sofrendo queda até 700 nm, onde ocorre absorção em 725 nm, na região do infravermelho próximo. No quadro 4 é possível visualizar as concentrações de TSS e Chl-a, bem como a média destas concentrações na classe 1.

Quadro 4 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na primeira classe

TSS - Classe 1		Chl-a - Classe 1	
PR10	4	PR10	7,758
PR11	2	PR11	5,557
Média	3	Média	6,6575

Figura 20 - Segunda classe de espectros agrupados

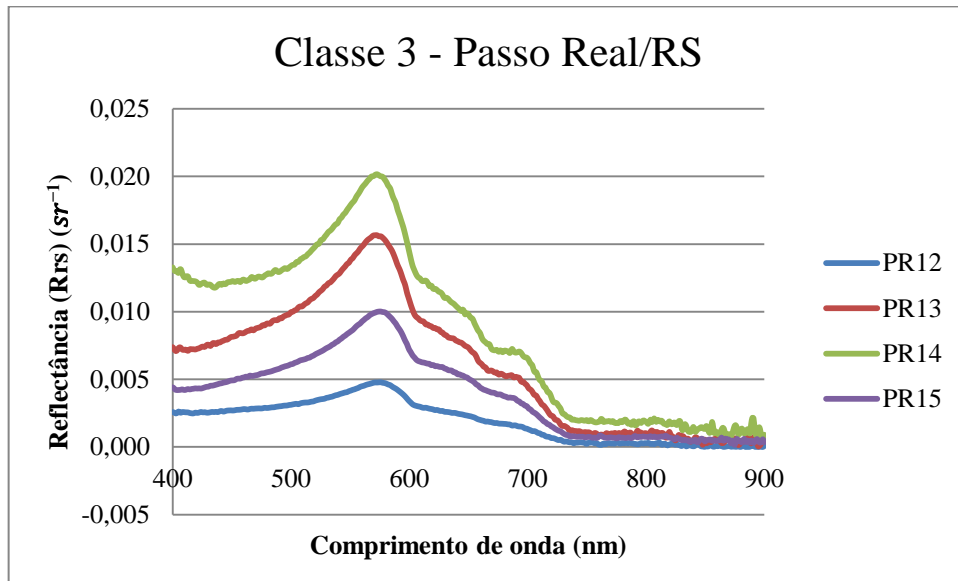


A classe 2 (Figura 20), por sua vez, é composto por nove espectros, referentes aos pontos amostrais PR1 a PR9. A assinatura espectral das amostras é semelhante, alcançando pico de reflectância na banda do verde, em 575 nm. Entretanto, os pontos PR2, PR4 e PR7 apresentam feições de absorção marcadas em 670 nm, na banda do vermelho, indicando maiores concentrações de Chl-a, seguido de espalhamento, enquanto o restante dos pontos apresenta uma queda menor de reflectância. No quadro 5 é possível visualizar que a classe 2 contém maior média de concentração de Chl-a, o que confirma as feições de absorção/espalhamento.

Quadro 5 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na Classe 2

TSS - classe 2		Chl-a - Classe 2	
PR1	12	PR1	13,64
PR2	8	PR2	46,9836
PR3	7	PR3	3,536
PR4	9	PR4	23,239
PR5	3	PR5	8,083
PR6	8	PR6	11,114
PR7	11	PR7	46,984
PR8	3	PR8	9,094
PR9	7	PR9	7,578
Média	7,555556	Média	18,91684

Figura 21 - Terceira classe de espectros agrupados



A terceira classe (Figura 21) é formada pelo agrupamento dos pontos amostrais PR12, PR13, PR14 e PR15 e possui espectros semelhantes, onde há picos de reflectância da região do verde, em 565 nm, acompanhado de uma queda em 600 nm. Os espectros dos pontos PR13 e PR14 apresentam-se com absorção levemente marcada na região do vermelho, em 665 nm. O quadro 7 contém as médias de concentração de chl-a e TSS.

Quadro 6 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na classe 3

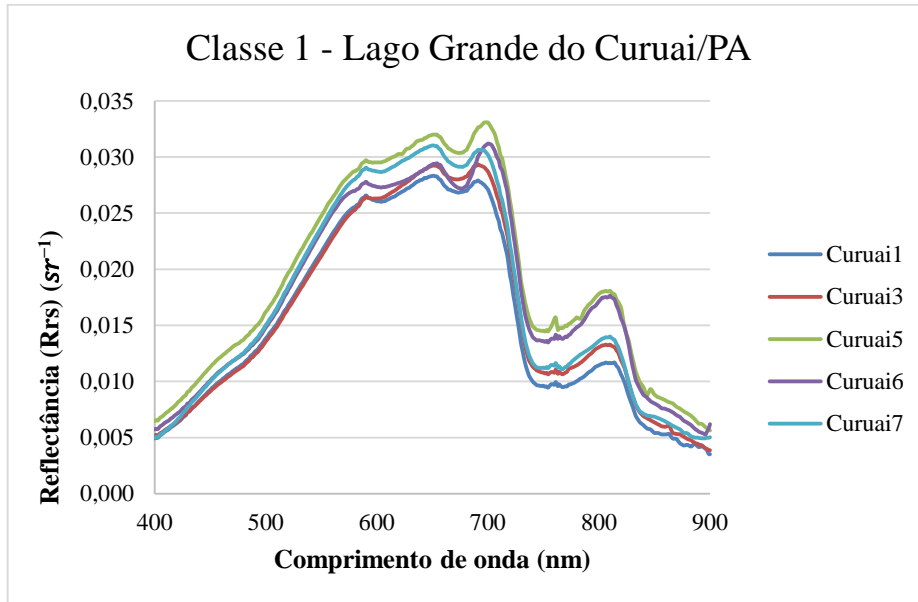
TSS - Classe 3		Chl-a - Classe 3	
PR12	7	PR12	5,7256
PR13	5	PR13	11,62
PR14	3	PR14	14,1456
PR15	2	PR15	5,052
Média	4,25	Média	9,1358

#### 6.4.2 Padrões Espectrais do Lago Grande do Curuai - PA

As classes dos espectros de Curuai também foram agrupadas pela ferramenta SAM e foram estipulados em três grupos de espectro. A primeira classe (Figura 22) é formada pelos pontos amostrais Curuai1, Curuai3, Curuai5, Curuai6 e Curuai7, pontos nos quais apresentam assinaturas semelhantes, salvo o ponto Curuai6, que se sobrepõe ao restante dos espectros em 670 a 700 nm. Há uma pequena feição de absorção em aproximadamente 670 nm, na banda do vermelho, causada pela clorofila-a e pico de reflectância em 700 nm, causado por

espalhamento pelas estruturas das algas, seguido de queda em 730 nm, na região do infravermelho próximo. Além disso, o espectro apresenta aumento da reflectancia em 800 nm, devido o espalhamento por partículas e uma queda em 830 nm.

Figura 22 - Primeira classe de espectros agrupados - Curuai



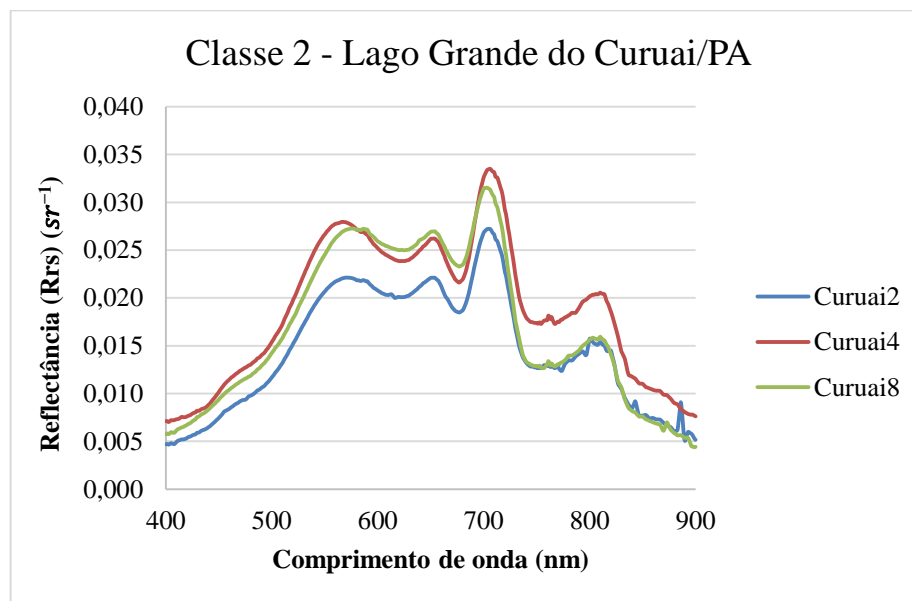
No quadro 7 estão expostas as concentrações de TSS e Chl-a na primeira classe de espectros de Curuai.

Quadro 7 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na classe 1

TSS - Classe 1		Chl-a - Classe 1	
Curuai1	26,334	Curuai 1	6,720
Curuai3	29,857	Curuai 3	6,410
Curuai5	44,143	Curuai 5	11,050
Curuai6	49,667	Curuai 6	24,580
Curuai7	24	Curuai 7	9,010
Média	34,8002	Média	11,554

A segunda classe de espectros de Curuai (Figura 23) é formada pelos pontos amostrais Curuai2, Curuai4 e Curuai8. As assinaturas apresentam-se semelhantes, com o espectro do ponto Curuai4 se sobrepondo aos outros. Uma feição marcada de absorção ocorre em 670 nm, na banda do vermelho, seguido por um pico de reflectância em 705 nm e queda em 740 nm, no infravermelho. Há também aumento de reflectância em 800 nm, ainda no infravermelho.

Figura 23 - Segunda classe de espectros agrupados - Curuai

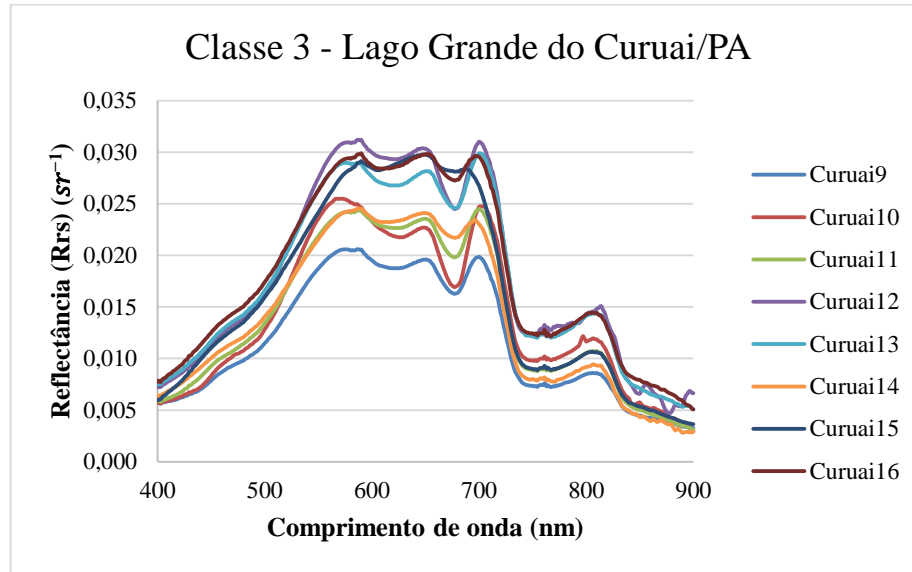


Quadro 8 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na classe 2

TSS - Classe 2		Chl-a - Classe 2	
Curuai2	38,8	Curuai 2	85,05
Curuai4	45,000	Curuai 4	21,67
Curuai8	45,834	Curuai 8	72,6
Média	43,21133	Média	59,77333

A classe 3 (Figura 24) é a que possui maior número de espectros agrupados, nos quais são formados pelos pontos Curuai9 a Curuai16. A assinatura espectral dos pontos amostrais segue semelhante, havendo uma feição marcada de absorção em 670 nm na grande maioria dos pontos, onde o ponto 15 apresenta menos absorção neste comprimento de onda, enquanto o restante dos pontos possuem feições de absorção mais marcadas. O pico de reflectância ocorre em aproximadamente 700 nm, seguida por uma queda em 730 nm. Outro pico de reflectância, em menor escala, ocorre em 800 nm.

Figura 24 - Terceira classe de espectros agrupados - Curuai



Quadro 9 - Concentrações de TSS e Chl-a e suas médias na classe 3

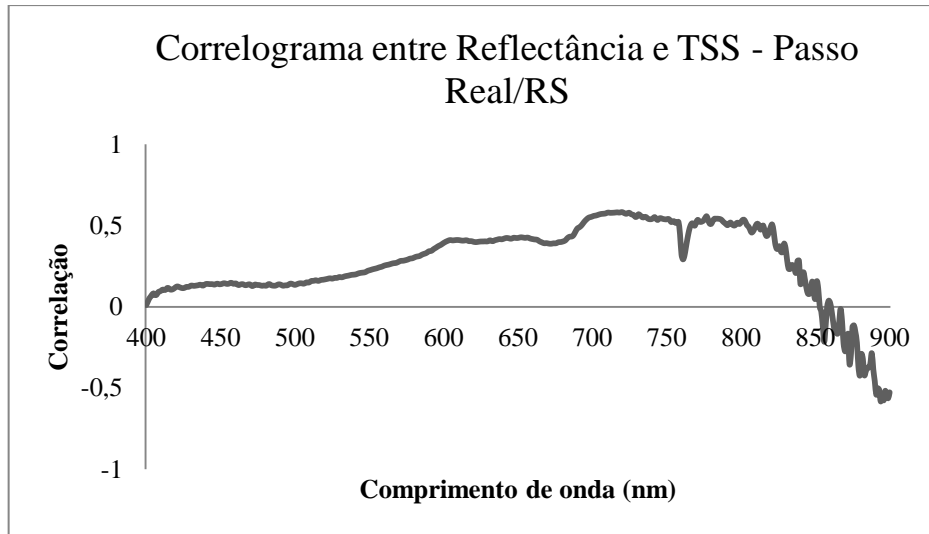
TSS Classe 3		Chl-a Classe 3	
Curuai9	21,429	Curuai 9	41,65
Curuai10	25,572	Curuai 10	31,66
Curuai11	23,715	Curuai 11	30,6
Curuai12	34,134	Curuai 12	57,36
Curuai13	33,5	Curuai 13	35,85
Curuai14	32,75	Curuai 14	10,26
Curuai15	18,75	Curuai 15	5,25
Curuai16	41,5	Curuai 16	25,5
Média	28,91875	Média	29,76625

## 6.5 Correlação e Modelos de regressão relacionados com TSS

### 6.5.1 Passo Real – RS

Primeiramente foram realizadas correlações entre a reflectância e as derivadas de primeira e segunda ordem. No correlograma entre a reflectância e a variável TSS obteve-se o melhor resultado no comprimento de onda de 720 nm, com  $r = 0,58$  (Figura 25).

Figura 25 - Correlação entre Reflectância e TSS



Em seu estudo em Passo Real PAULA (2015) gerou um correlograma entre TSS e a reflectância a partir da razão de bandas nos dados de uma imagem RapidEye e obteve maior correlação na região do infravermelho próximo, com  $r$  superior a 0,9. Este resultado proporcionou um modelo de regressão de  $R^2 = 0,87$ , sendo satisfatório. No caso dos dados de reflectância e TSS obtidos in situ no reservatório Passo Real, o correlograma foi menos satisfatório ( $r = 0,58$ ), bem como o modelo de regressão em 720 nm, que resultou em  $R^2 = 0,34$  (Figura 26). Esta discrepância se dá devido à diferença de amostragem, além desta pesquisa utilizar dados de reflectância in situ.

Figura 26 – Modelo de regressão entre TSS e Reflectância

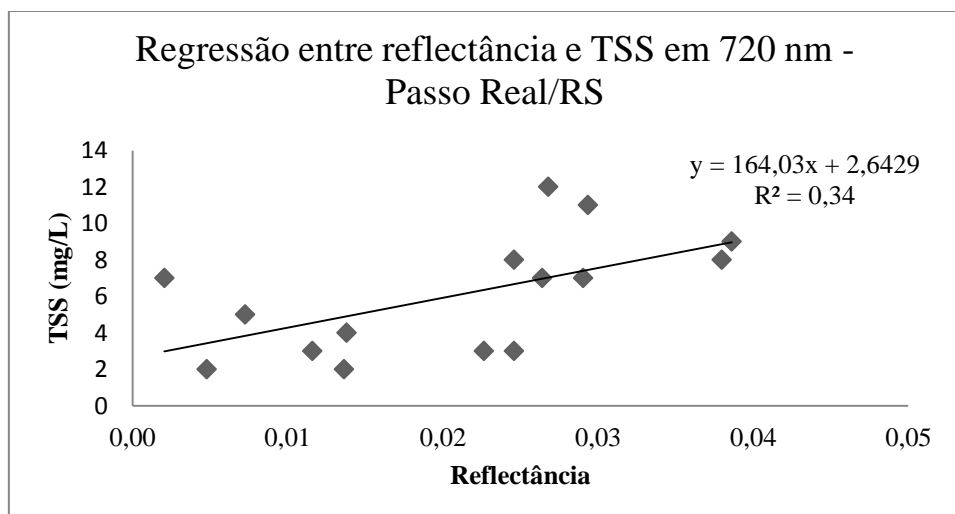
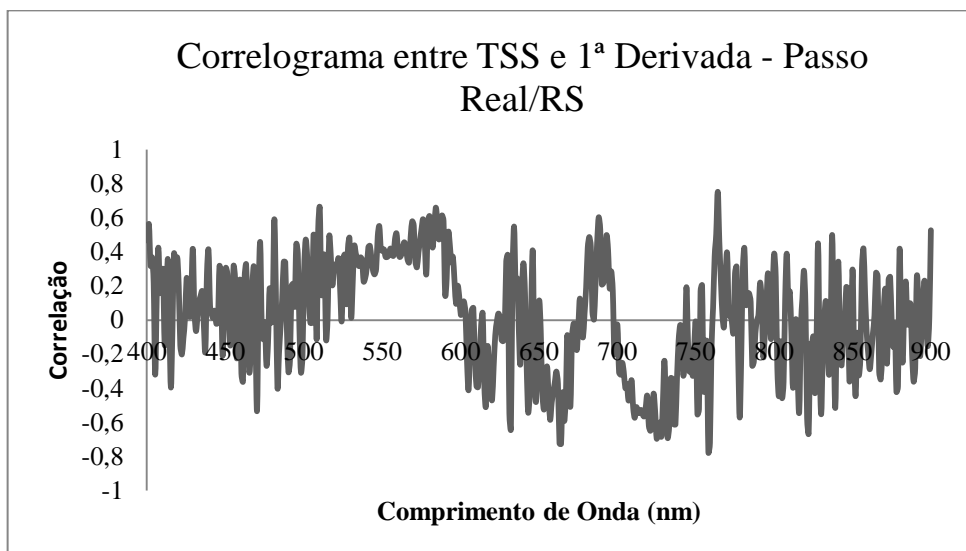


Figura 27 - Correlação entre TSS e derivada de primeira ordem

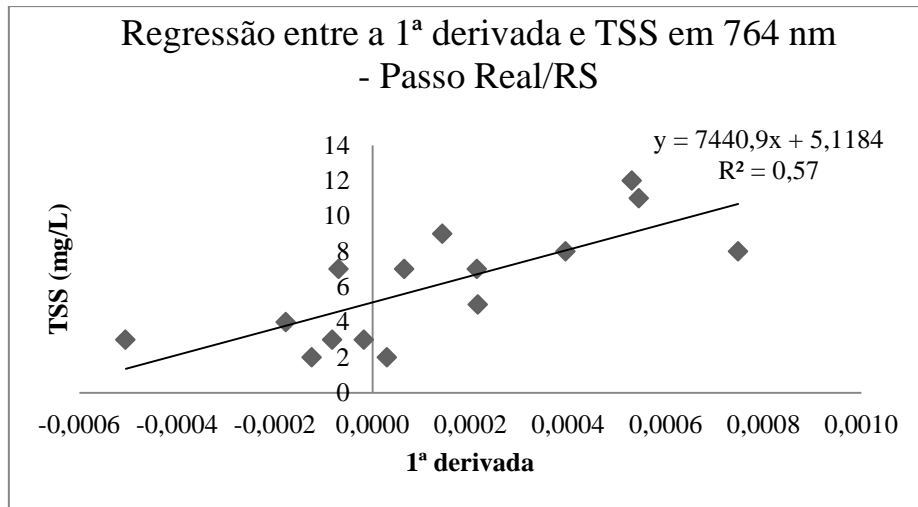


Na correlação entre a derivada de primeira ordem e TSS (Figura 27) obteve-se resultado mais satisfatório, no qual o  $r$  alcançou 0,75, em 764 nm, correspondente à região do infravermelho próximo, ao mesmo tempo em que se obteve correlação inversa em 758 nm, com  $r = -0,77$ . Em seu estudo para estimar a concentração de sólidos suspensos e clorofila-a no Rio Bonito (SP), FAGA et. al (2015) encontraram correlação entre a primeira derivada e TSS, na qual resultou em  $r = 0,73$ , em 774 nm, semelhante à correlação obtida nesta pesquisa. Além disto, o modelo de regressão gerado a partir do TSS e do comprimento de onda de 774 nm resultou em  $R^2 = 0,52$ , também semelhante ao encontrado no modelo gerado nesta pesquisa (Figura 26).

Outro resultado relevante e semelhante aos encontrados nesta análise foi um estudo realizado no Lago Guaíba, RS, no qual TONIOLO (2016) obteve correlação entre a as derivadas de primeira ordem e TSS de 0,66 em 772 nm, também na região do infravermelho próximo, enquanto o modelo de regressão apresentou  $R^2 = 0,44$ .

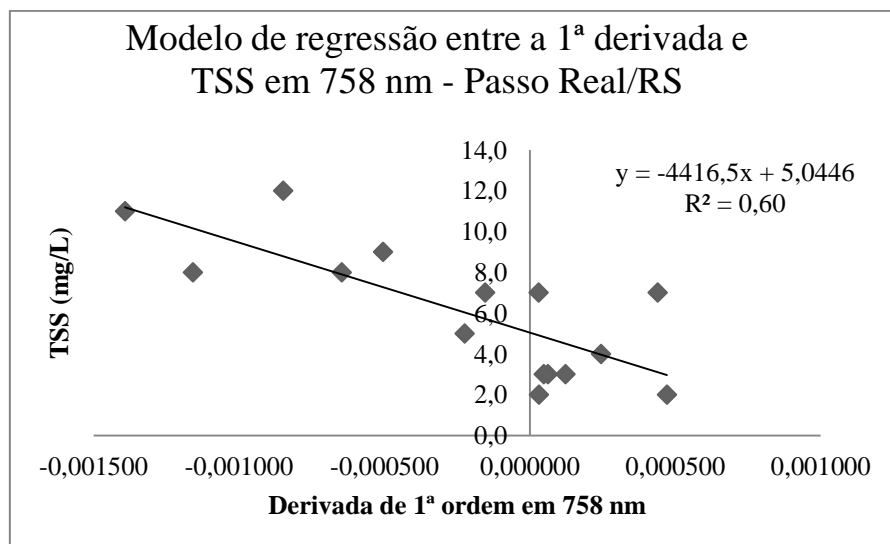


Figura 28 - Modelo de Regressão entre a derivada de primeira ordem e TSS em 764 nm



O modelo de regressão ajustado a partir das derivadas de primeira ordem e TSS em 764 nm foi mais satisfatório, uma vez que a primeira derivada permite a remoção do sinal da reflectância da água e facilita a detecção de TSS (GOODIN, 1993). Embora a primeira derivada permita a detecção do TSS mais facilmente, o resultado ainda se mostrou moderado (Figura 28). O modelo de regressão ajustado a partir da maior correlação inversa, em 758 nm, apresentou valor de  $R^2$  semelhante, alcançando 0,60 (Figura 29).

Figura 29 - Modelo de Regressão entre a derivada de primeira ordem e TSS em 758 nm



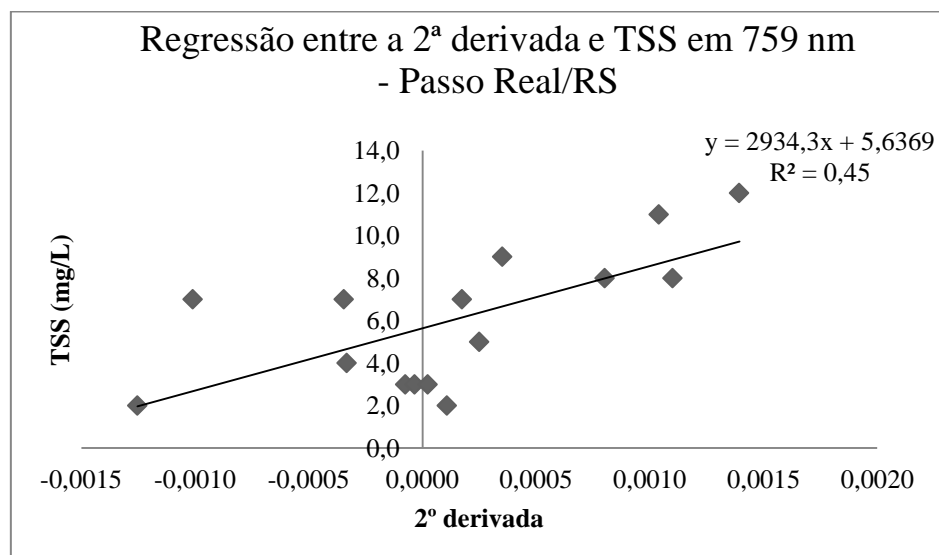
O correlograma gerado entre TSS e a derivada de segunda ordem resultou em uma ótima correlação inversa e boa correlação, na qual alcançou  $r = -0,84$  em 757 nm e  $r = 0,67$  em 759 nm, respectivamente (Figura 30).

Figura 30 - Correlação entre TSS e derivada de segunda ordem



O ajuste do modelo entre a segunda derivada e TSS em 759 nm também apresentou resultado insatisfatório, alcançando  $R^2 = 0,45$  (Figura 31). Segundo GOODIN (1993) a derivada de segunda ordem é apropriada para remover os efeitos de TSS, sendo favorável na detecção da clorofila.

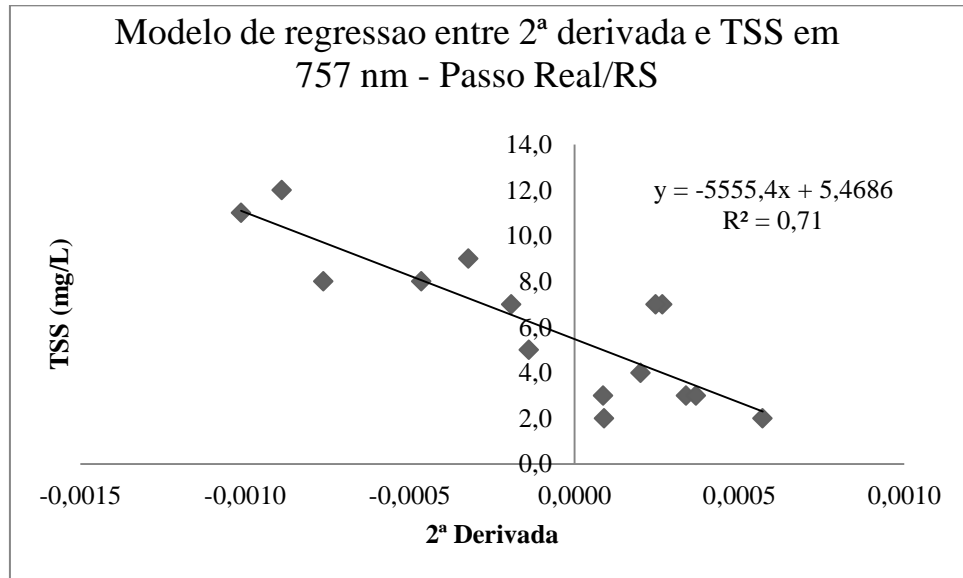
Figura 31 - Modelo de Regressão entre a derivada de segunda ordem e TSS em 759 nm



O resultado mais satisfatório de  $R^2$  foi encontrado a partir das derivadas de segunda ordem correspondentes à melhor correlação inversa e o TSS, onde se obteve  $R^2 = 0,71$  (Figura

32), onde o resultado se dá devido a uma queda de reflectância em 757 nm, marcada pela absorção dos sólidos inorgânicos neste comprimento de onda.

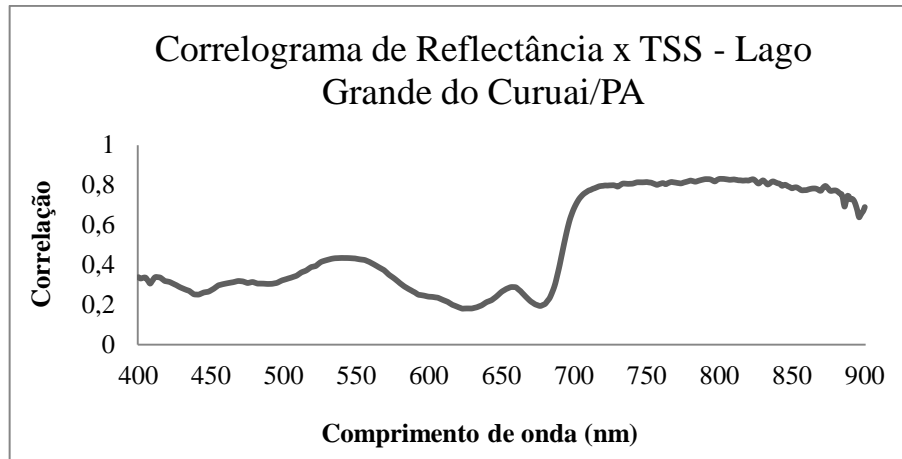
Figura 32 - Modelo de Regressão entre as derivadas de segunda ordem e TSS em 757 nm



### 6.5.2 Lago Grande do Curuai

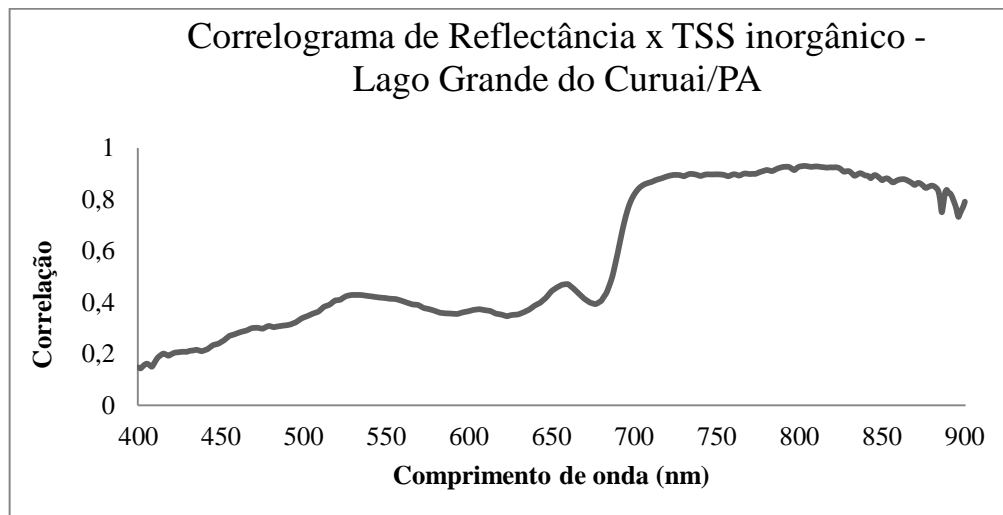
Com os dados dos espectros foram realizadas as correlações entre as reflectâncias de sensoriamento remoto e o TSS a fim de identificar os comprimentos de onda que melhor se relacionam com a variável TSS (Figura 33). A partir do correlograma foi possível visualizar crescimento da correlação a partir de 700 nm, na região do infravermelho próximo. A maior correlação ocorreu no comprimento de onda 801 nm, na região do infravermelho próximo, com  $r = 0,83$ , ou seja, 83% das reflectâncias variam no mesmo sentido de TSS e possuem correlação direta e significativa.

Figura 33 - Correlação entre as reflectâncias e o TSS



Também foi realizada a correlação utilizando apenas os sólidos inorgânicos relacionados à reflectância (Figura 34).

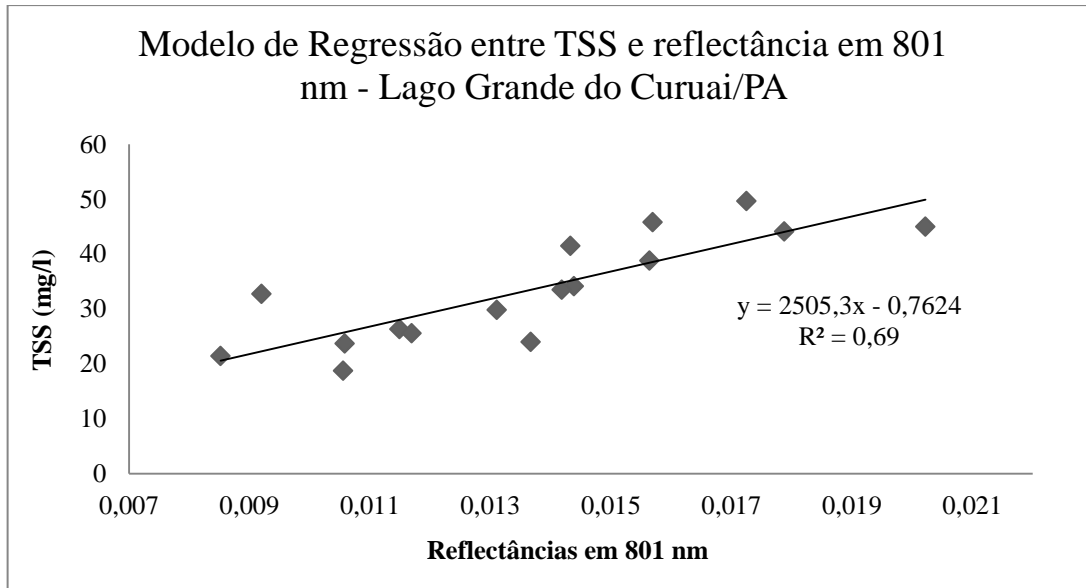
Figura 34 - Correlação entre os sólidos inorgânicos e as reflectâncias



Embora possuam curvas semelhantes, os dois correlogramas são distintos, uma vez que há maior correlação entre as reflectâncias e os sólidos inorgânicos, alcançando correlação de  $r = 0,93$  no comprimento de onda de 803 nm.

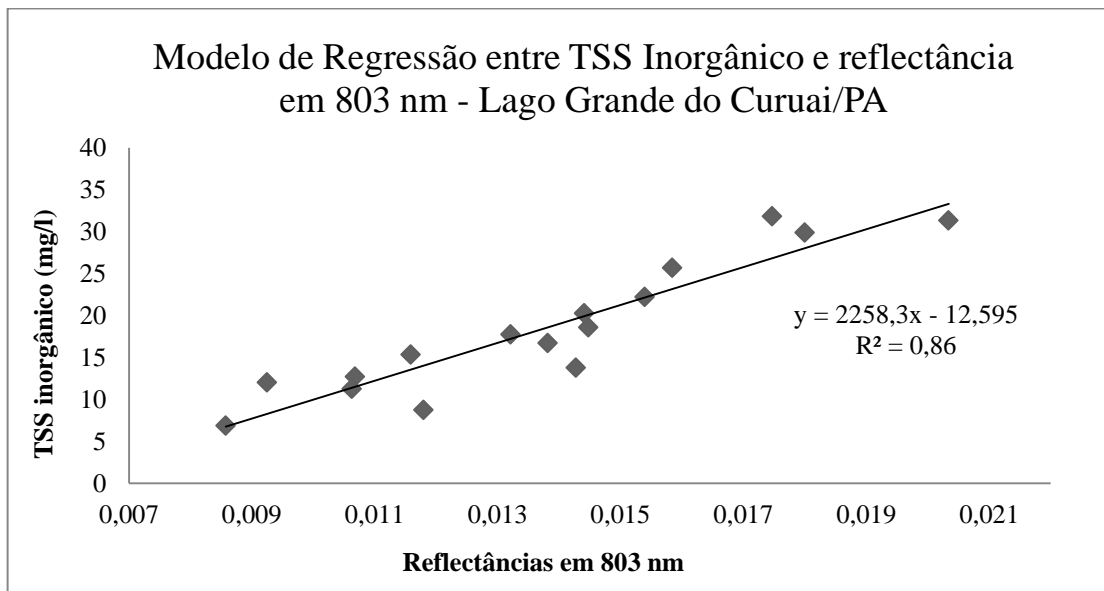
A partir disto foi realizado um modelo de regressão utilizando as reflectâncias em 801 nm e o TSS, resultando em  $R^2 = 0,69$  (Figura 35). O modelo em questão mostrou que 69% das reflectâncias podem ser explicadas a partir do TSS.

Figura 35 - Modelo de regressão entre TSS e as reflectâncias em 801 nm



Para os sólidos inorgânicos foi realizado o modelo de regressão com as reflectâncias em 803 nm, comprimento de onda que apresentou melhor correlação com TSS, sendo o maior valor de  $R^2$  encontrado (Figura 36). A partir deste resultado pode-se concluir que 86% dos valores de reflectância podem ser explicados pela concentração de TSS inorgânico.

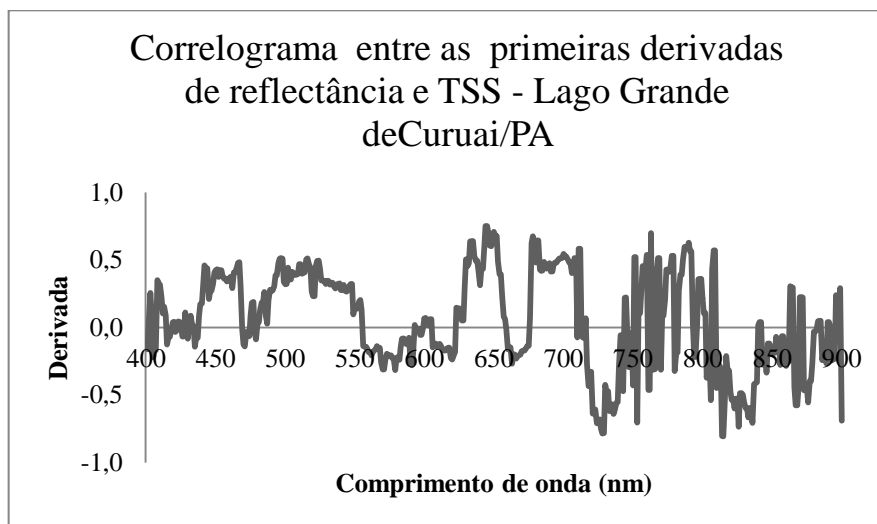
Figura 36 - Modelo de regressão em TSS inorgânico e as reflectâncias em 803 nm



A partir do espectro de reflectância, foram realizados testes e análises estatísticas para melhor compreensão do comportamento espectral. Primeiramente foi realizada a análise derivativa de primeira ordem nas reflectâncias, a fim de evidenciar os pontos onde ocorrem mudanças bruscas na resposta espectral. Após calcular a primeira derivada das reflectâncias

em cada ponto, foi gerado um correlograma (figura 37) onde se relacionou as derivadas com os valores de TSS em cada comprimento de onda.

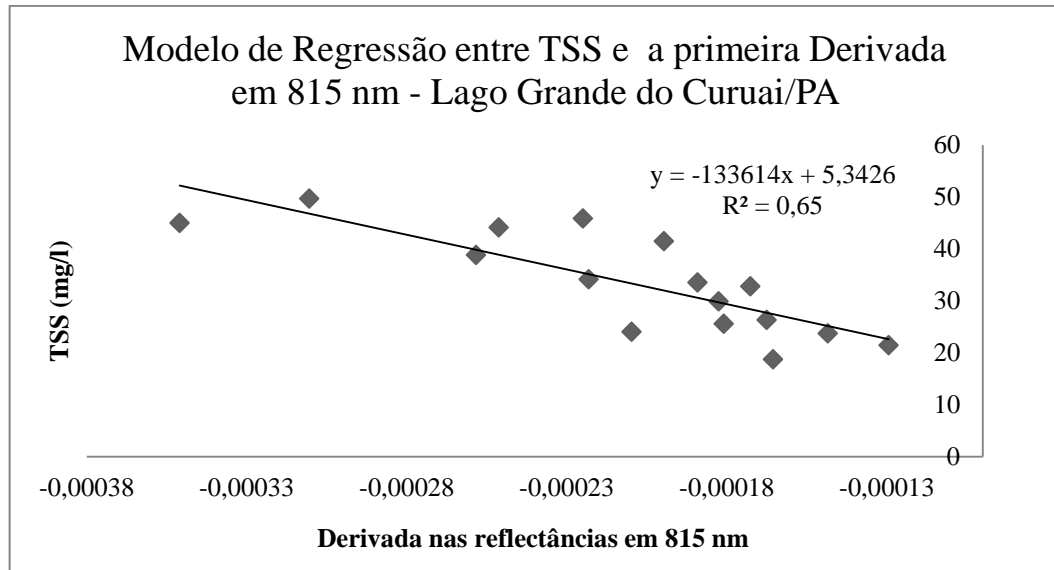
Figura 37 - Correlação entre as derivadas de reflectância e TSS



O correlograma mostra maior correlação positiva no comprimento de onda 645 nm, na banda do vermelho, com valor de 0,75, enquanto a maior correlação negativa resultou em -0,80 no comprimento de onda 815 nm, na região do infravermelho próximo. Isto significa que nos dois comprimentos de onda há boas correlações, indicando comportamento proporcional e inversamente proporcional, respectivamente.

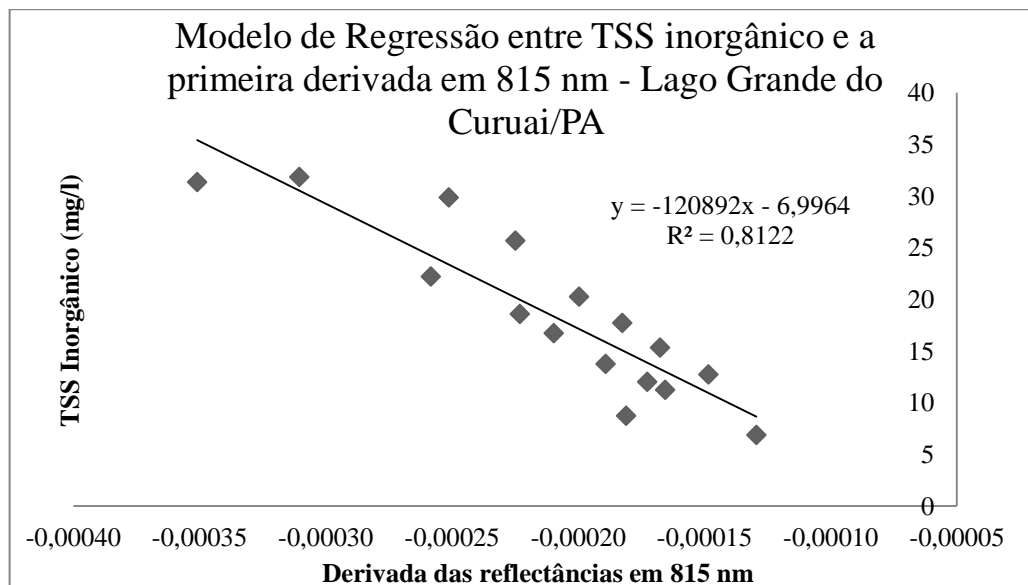
Foram utilizadas para o modelo de regressão as reflectâncias no comprimento de onda de 815 e os valores de TSS, resultando em  $R^2 = 0,65$  (Figura 38). Isto significa que 64% das reflectâncias derivadas em primeira ordem explicam a concentração de TSS. WATANABE (2010) realizou um estudo no alto curso da bacia do Paraná e também encontrou uma excelente correlação na região do infravermelho próximo, em 811 nm, com  $r = 0,98$ . Porém, seu modelo de regressão entre TSS e a 1ª derivada em 811 apresentou um alto  $R^2$ , com 0,97, enquanto a análise em Curuai apresentou  $R^2$  mais baixo.

Figura 38 - Regressão entre TSS e a derivada de primeira ordem em 815 nm



As derivadas das reflectâncias no comprimento de onda 815 nm também foram utilizadas para a geração do modelo de regressão em relação ao TSS inorgânico, onde alcançou  $R^2 = 0,81$  (figura 39), valor mais elevado do que o obtido para o TSS como um todo.

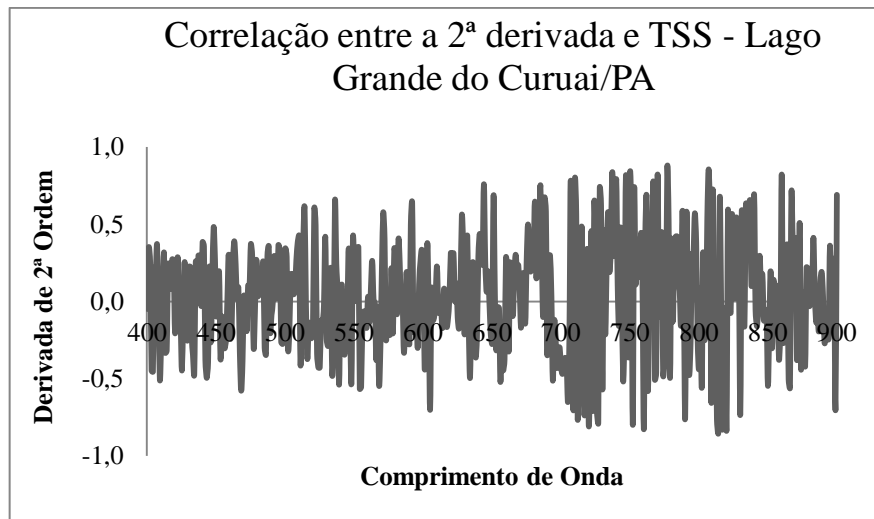
Figura 39 - Regressão entre TSS inorgânico e as derivadas de primeira ordem das reflectâncias em 815 nm



A derivada de primeira ordem mostra-se eficaz nos modelos utilizados para estimar TSS, similar ao estudo realizado por RUDORFF et. al. (2007), onde alcançou  $r^2 = 0,86$  em 711 nm, com a utilização do conjunto de dados Hyperion. No caso dos dados espectrais e de TSS do Lago Grande do Curuai, o melhor ajuste do modelo apresentou  $r^2 = 0,81$  em 815 nm, ainda no infravermelho próximo.

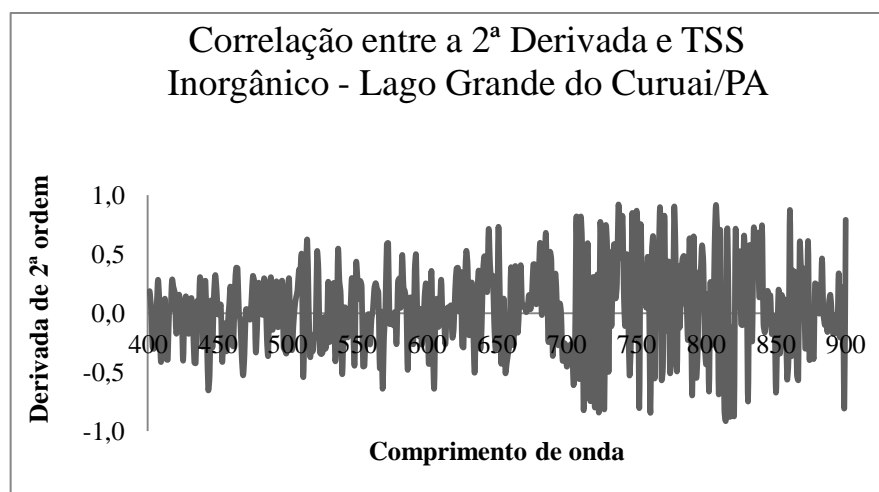
Após a análise derivativa de primeira ordem, partiu-se para a obtenção da análise de segunda ordem, a fim de avaliar se seria possível aumentar o nível de confiança dos modelos. A maior correlação identificada pelo correlograma, entre a derivada de segunda ordem e o TSS ocorreu no comprimento de onda de 777 nm, na região do infravermelho próximo, com  $r = 0,86$  (Figura 40).

Figura 40 - Correlograma entre a derivada de 2ª ordem e TSS



Por conseguinte foi gerado outro correlograma, relacionando as derivadas de segunda ordem e o TSS inorgânico. Neste caso, a maior correlação ocorreu no comprimento de onda de 807 nm, com  $r = 0,91$  (Figura 41).

Figura 41 – Correlograma entre a derivada de 2ª ordem e TSS Inorgânico

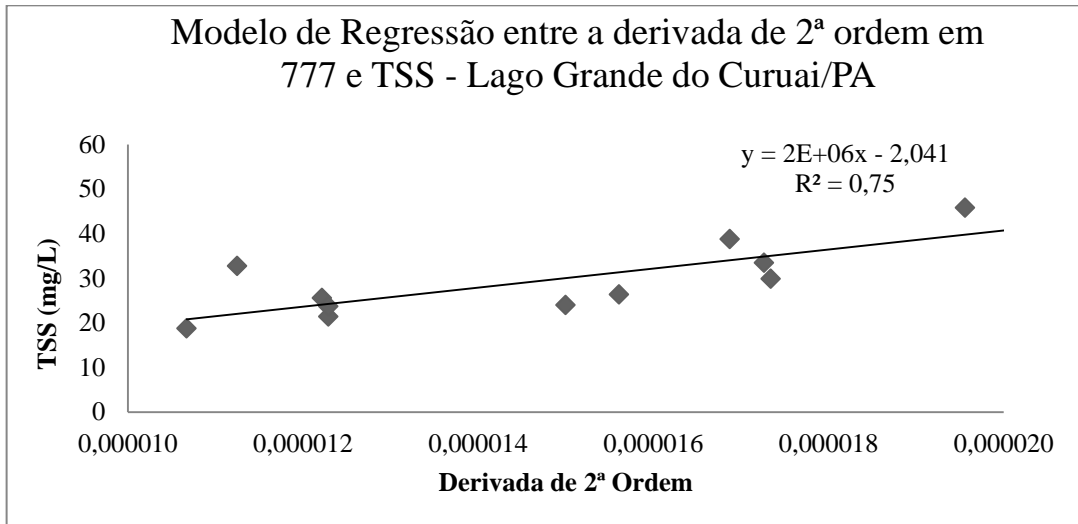


Concluída as correlações entre as derivadas de 2ª ordem e o TSS total e inorgânico foram gerados modelos de regressão. Primeiro um modelo entre a 2ª derivada e TSS em 777



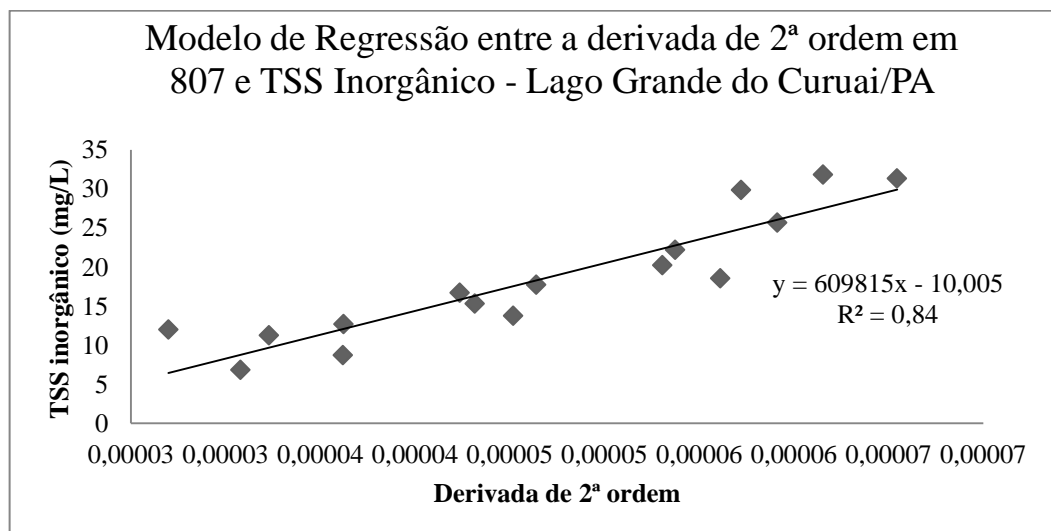
nm, comprimento de onda onde se obteve maior correlação. Diante disso foi obtido  $R^2 = 0,75$  (Figura 42).

Figura 42 - Modelo de Regressão entre a 2ª derivada e TSS em 777 nm



O outro modelo de regressão foi gerado a partir da correlação entre a derivada de 2ª ordem e TSS inorgânico, sendo adotado o comprimento de onda de 807 nm, com maior significância e resultou em  $R^2 = 0,84$ , valor maior que o modelo gerado com o TSS (Figura 43).

Figura 43 - Modelo de Regressão entre a 2ª derivada e TSS Inorgânico em 807 nm



Os modelos gerados possibilitaram analisar que o modelo de regressão que obteve valores mais significativos foi aquele relacionados ao TSS inorgânico e a reflectância em 807

nm. Além disso, as derivadas de segunda ordem relacionadas com TSS inorgânico em 807 também obtiveram  $R^2$  satisfatório.

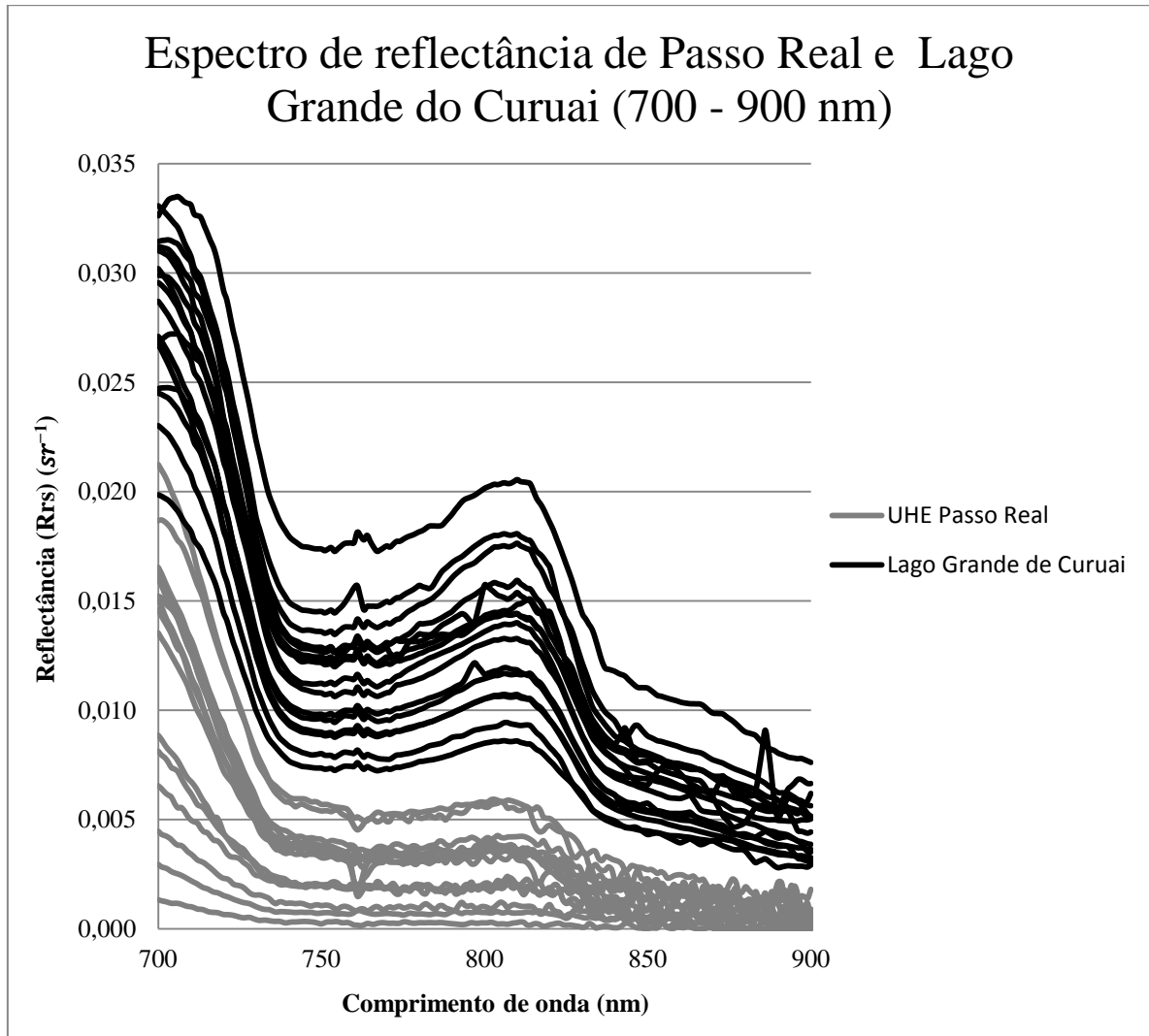
A partir das análises dos resultados nas duas áreas de estudo pode-se observar semelhanças no que diz respeito às reflectâncias relacionadas ao TSS, onde as duas áreas de estudo apresentaram maiores correlações na região do infravermelho próximo, confirmando os resultados encontrados por HAN (1997), que mostra em experimentos com tanques de água clara e água com grande concentração de algas, se obteve aumento das reflectâncias entre 720 e 900 nm. Isto é percebido no espectro de reflectância do Lago Grande do Curuai, onde há aumento da correlação entre o dado de reflectância e o TSS na região do infravermelho. O Reservatório de Passo Real, por sua vez, apresentou menos reflectância nesta banda, devido às pequenas concentrações de TSS, em comparação com o espectro do lago Grade de Curuai. Esta diferença também influenciou nas correlações com TSS, que apresentaram valores menores na UHE Passo Real.

## **6.6 Comparação dos espectros de reflectância**

Os espectros obtidos em campo, nas duas áreas de estudo, apresentaram amplitudes de reflectância semelhantes entre si. O ponto amostral de maior pico de reflectância em Passo Real foi o PR9, com reflectância de 0,038 na região do verde, em 574 nm, valor este que indica maior concentração de Chl-a (46  $\mu\text{g/L}$ ). Já no Lago Grande do Curuai, obteve-se maior pico o ponto Curuai4, com 0,032, na região do infravermelho próximo, em 705 nm, sinalizando maior concentração de TSS (45  $\text{mg/L}$ ).

Na figura 44 os espectros do Lago Grande do Curuai e de Passo Real foram unidos em um mesmo gráfico e restrito entre 700 a 900 nm, na região em que os modelos de regressão foram ajustados nas duas áreas. É possível identificar que as assinaturas espectrais das áreas de estudo estão bem definidas nesta região, onde o espectro de Curuai apresenta-se com maior valor de reflectância.

Figura 44 - Espectros de reflectância de Passo Real e Lago Grande do Curuai na região do infravermelho próximo



Quanto os modelos de regressão, os dados de TSS inorgânico em Curuai foram os que apresentaram melhores resultados, chegando a alcançar  $R^2 = 0,84$  na derivada de segunda ordem, em 807 nm, na banda do infravermelho. Em Passo Real, por sua vez, não foi possível realizar o modelo com o TSS inorgânico por estes dados não estarem disponíveis, contendo apenas o TSS.

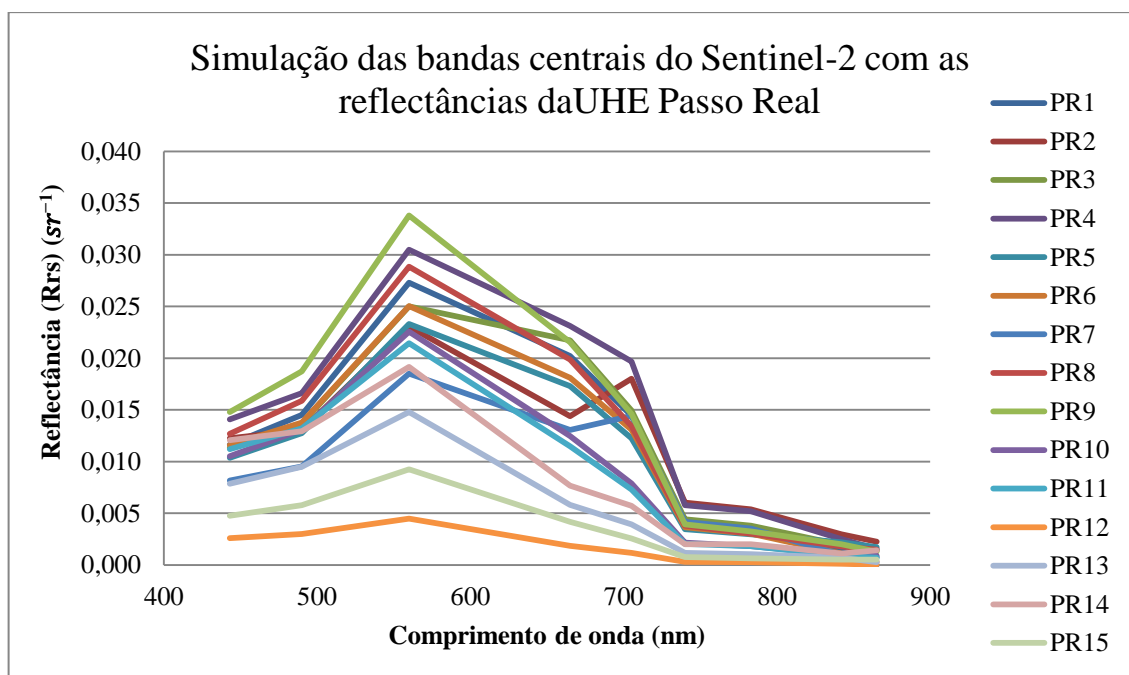
O modelo que se ajustou nos dois espectros, com pouca diferença de valores foi o realizado a partir da derivada de segunda ordem que, em Passo Real apresentou  $R^2 = 0,71$ , em 757 nm, e em Curuai obteve-se  $R^2 = 0,74$  em 777 nm. O modelo de regressão em questão indicou que mais de 70% da assinatura espectral nestes comprimentos de onda se deram por conta do TSS e foi satisfatório para as duas áreas de estudo.

## 6.7 Simulação de bandas centrais do Sentinel-2

### 6.7.1 UHE Passo Real

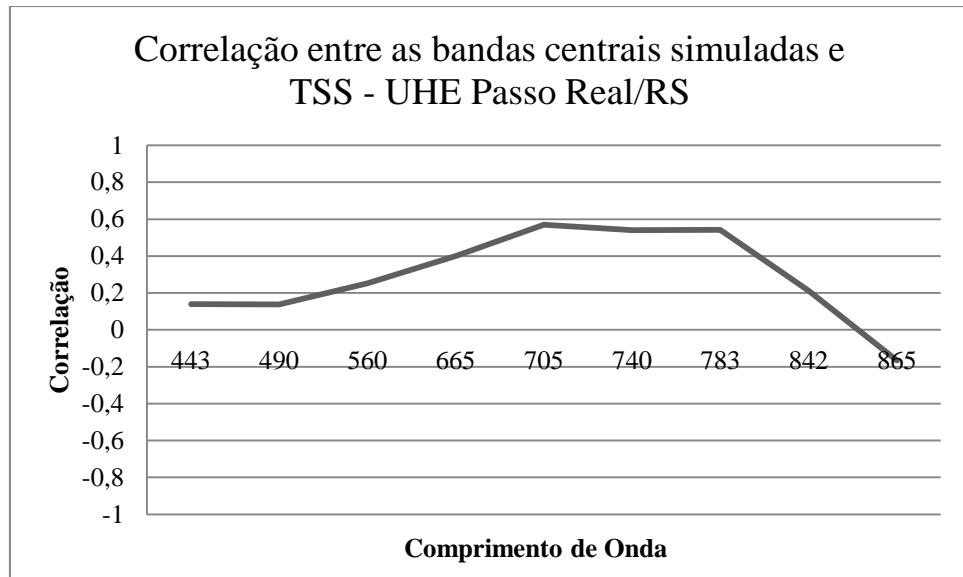
A simulação de bandas centrais do Sentinel-2 com os dados espectrais de Passo Real mostrou um espectro de reflectância marcado por picos de reflectância em 560 nm, na banda do verde e feições de absorção entre 600 e 700 nm, na banda do vermelho, nos pontos PR2 e PR7, pontos estes caracterizados por apresentarem maior concentração de TSS. Além disso, o espectro apresentou absorção em 740 nm, seguida de um leve pico de reflectância no infravermelho próximo (Figura 45).

Figura 45 - Simulação das bandas centrais do Sentinel a partir de dados de reflectância de Passo Real



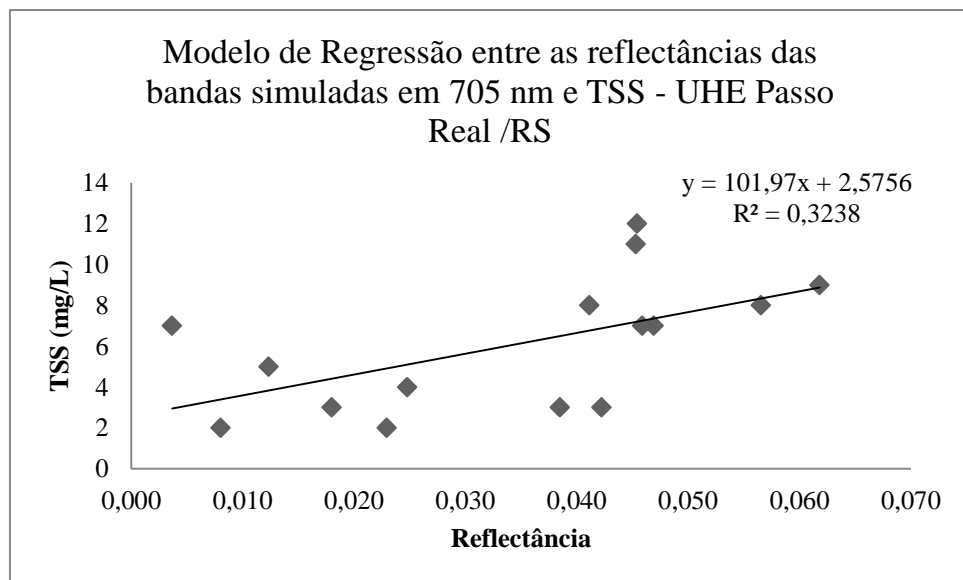
A maior correlação entre o TSS e as reflectâncias simuladas foi de  $r = 0,56$  no comprimento de onda de 705 nm, indicando que 56% da reflectância neste comprimento de onda se dão em função do TSS (Figura 46).

Figura 46 - Correlação entre as bandas simuladas do Sentinel-2 e TSS em Passo Real



A partir da maior correlação foi ajustado um modelo de regressão em 705 nm, que resultou em  $R^2 = 0,32$ , insatisfatório para explicar TSS (Figura 47).

Figura 47 - Modelo entre as bandas simuladas do Sentinel 2 e TSS em Passo Real



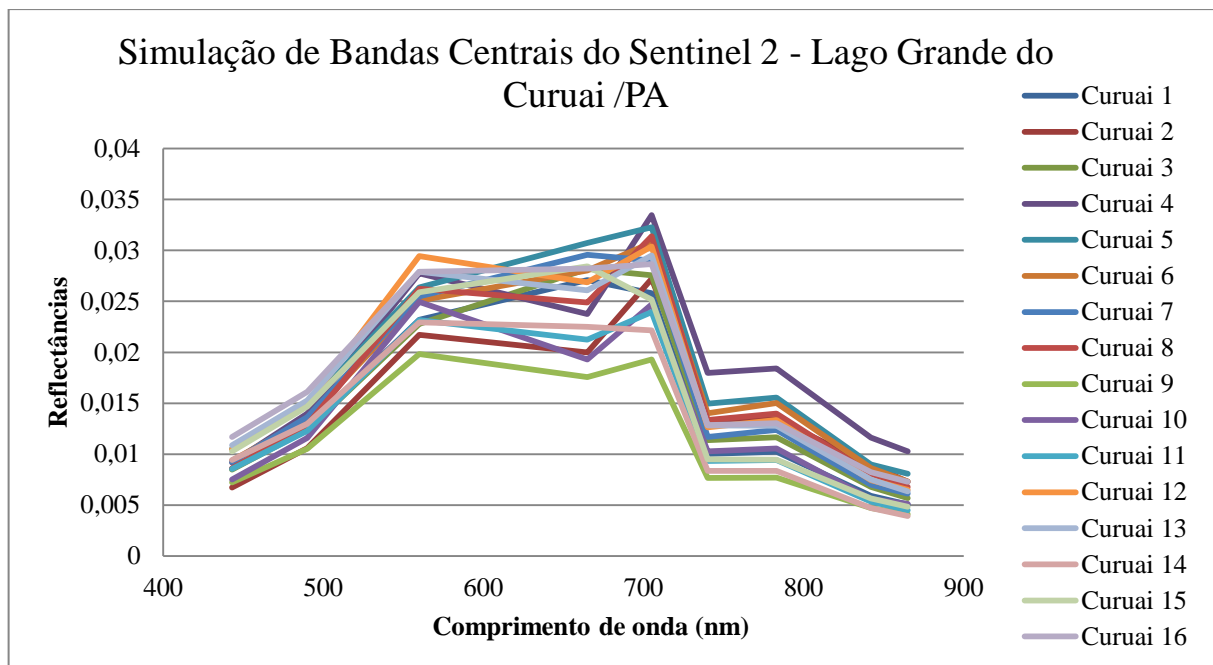
Entre os modelos ajustados a partir da simulação das bandas centrais do Sentinel-2, os melhores resultados encontrados foram em Curuai, no qual se obteve  $R^2 = 0,82$  no modelo gerado a partir do TSS inorgânico e a reflectância. Os modelos de TSS orgânico/inorgânico e reflectância de Curuai apresentaram  $R^2 = 0,67$ . O modelo da simulação em Passo Real

apresentou baixo  $R^2$ , com 0,32. Apesar da diferença de valores de  $R^2$  em Passo Real e Curuai, as bandas do Sentinel-2 mostraram-se eficientes, uma vez que, por se tratar de uma imagem multiespectral, apresentou feições bem marcadas nos dois espectros.

### 6.7.2 Lago Grande do Curuai

Foi realizada a correlação entre as reflectâncias das bandas centrais do Sentinel e o TSS, com o objetivo de descobrir o quanto o TSS é responsável pela assinatura espectral apresentada (Figura 48).

Figura 48 - Simulação das bandas do Sentinel 2



O correlograma gerado a partir das bandas centrais e o TSS (Figura 49) apresentou maior correlação em 783 nm nos dois tipos de sedimentos, sendo a correlação de 0,81 para o TSS e 0,91 para o TSS inorgânico. A partir disto foi ajustado um modelo de regressão para cada correlação.

Figura 49 - Correlograma entre TSS e bandas centrais do Sentinel 2

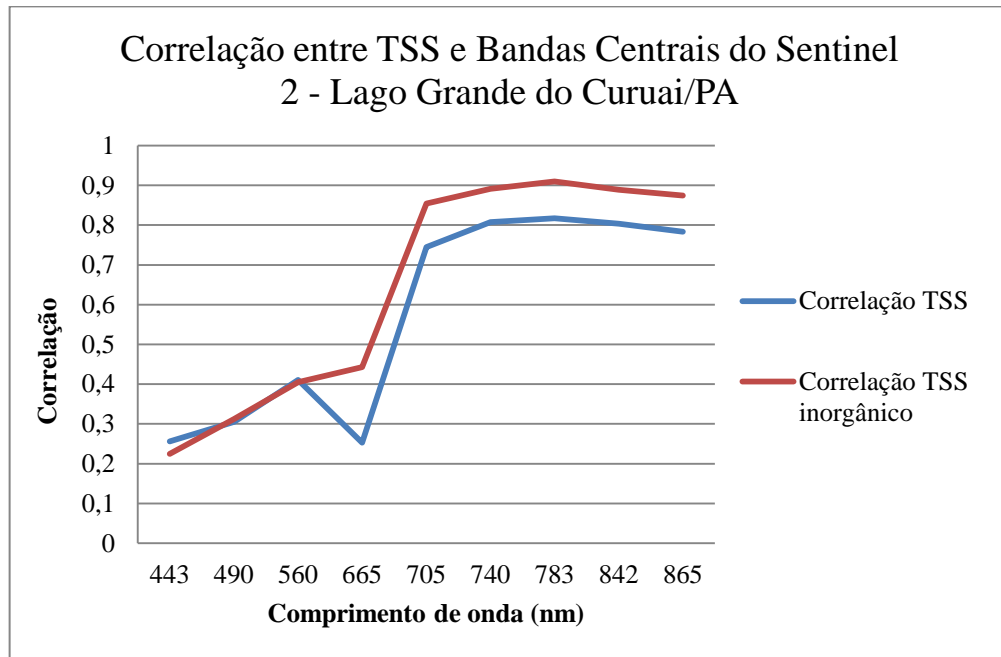
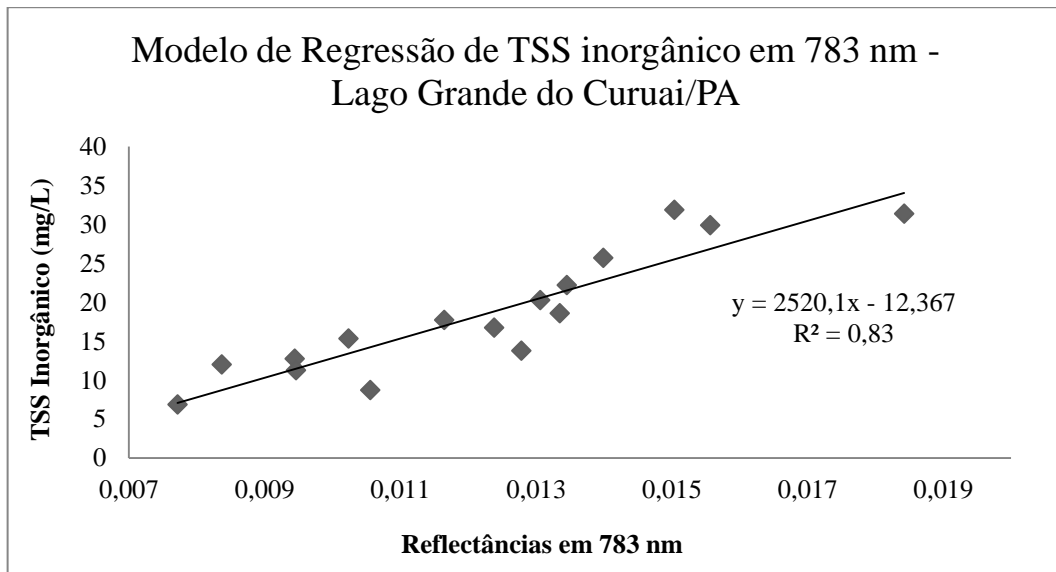
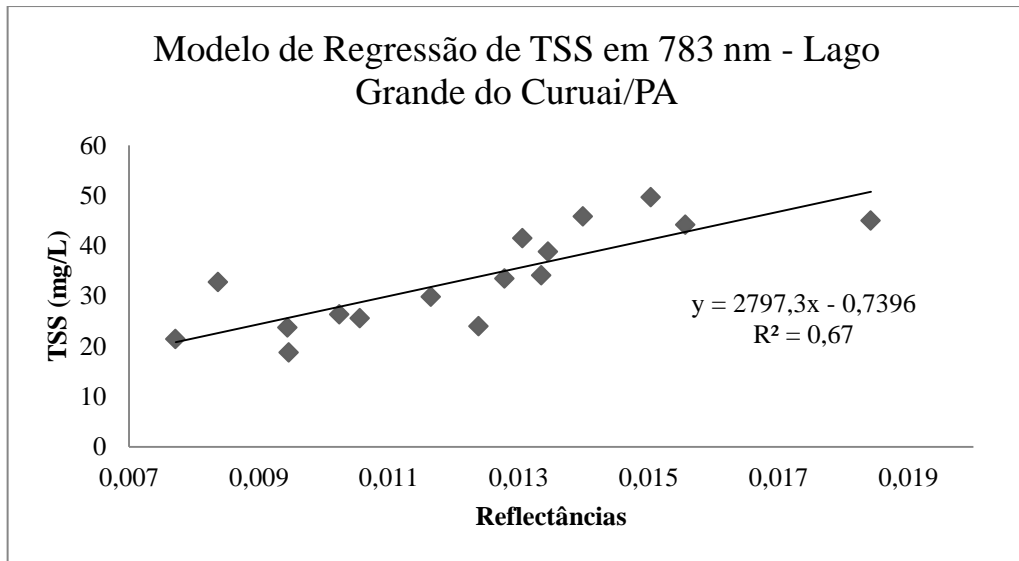


Figura 50 - Modelo de Regressão de TSS inorgânico em 783 nm



O modelo de regressão ajustado para o TSS inorgânico resultou em  $R^2 = 0,83$  (Figura 50), valor este significativo para explicar a relação do TSS inorgânico em 783 nm. Diferentemente deste modelo, o modelo ajustado entre o TSS e as reflectâncias em 783 nm apresentou valor menos significativo, de  $R^2 = 0,67$  (Figura 51).

Figura 51 - Modelo de Regressão de TSS em 783 nm





## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa baseou-se em analisar as concentrações de TSS em duas áreas de estudo distintas, localizadas em diferentes biomas e situados em pontos extremos do Brasil com características diferentes. Uma área, O Lago Grande do Curuai, situado no bioma amazônico, composto principalmente por florestas de terra firme, de várzea e de igapó e seu clima caracterizado como clima equatorial úmido. Além disso, sua área é caracterizada pela pecuária e produção agrícola, onde há grande expansão de lavouras de soja. A outra área de estudo, a UHE Passo Real, por sua vez, localiza-se no bioma Mata Atlântica, com clima subtropical úmido, composto por fragmentos de floresta e áreas de agricultura e pecuária. Há grandes diferenças entre estas áreas, todavia, as duas áreas de estudos são importantes para subsistência das populações residentes.

As duas áreas de estudo foram estabelecidas nesta pesquisa com o intuito de serem comparadas a partir da limnologia e do sensoriamento remoto, pois são áreas bastante pesquisadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos (RS) e em Santa Maria (RS) e uma pesquisa que integre os dados destas duas áreas tornou-se um desafio e uma experimentação necessária, uma vez que os modelos empíricos vêm sendo realizados em diferentes massas d'água com o foco em conhecer os constituintes das águas e aperfeiçoar as pesquisas em sensoriamento remoto.

O objetivo geral proposto nesta pesquisa, que compreende em *realizar um estudo comparativo entre os sólidos em suspensão na Planície do Lago Grande do Curuai (PA) e no reservatório Passo Real (RS), a partir de seus espectros de reflectância, relacionados com a concentração de sólidos em suspensão* foi atendido satisfatoriamente, pois, este fez-se possível devido à integração dos dados espectrais e da variável limnológica referente aos sólidos em suspensão.

Os objetivos específicos também foram atendidos nesta pesquisa, sendo o primeiro objetivo o de *analisar os espectros de reflectância do Lago do Curuai e do reservatório Passo Real*. Este objetivo foi alcançado a partir dos dados espectrais oriundos das campanhas de campo com a utilização de espectro radiômetros, nos quais foram obtidos os espectros de reflectância das duas áreas e analisados separadamente, além de serem agrupados em classes de espectros com formas semelhantes com a técnica SAM. Esta foi uma análise inicial dos espectros.

O segundo objetivo estabelecido nesta pesquisado foi o de *relacionar as diferentes respostas espectrais com suas concentrações de sólidos em suspensão a partir de testes*

*estatísticos e geração de modelos empíricos em cada área de estudo*, realizado após a análise inicial dos espectros. Este objetivo foi alcançado uma vez que foram realizadas análises nas duas áreas de estudo utilizando-se do TSS para descobrir o quanto esta variável foi responsável pelas assinaturas espectrais nas áreas de estudo. Diante disso, os melhores modelos ajustados foram obtidos quando integrados à reflectância em 803 nm e o TSS inorgânico, dado disponível apenas em Curuai, no qual alcançou  $R^2 = 0,86$ , indicando que 86% da assinatura espectral no infravermelho se deram a partir do TSS inorgânico. O modelo ajustado em 807 nm, com o TSS inorgânico e a derivada de segunda ordem obteve resultado semelhante, alcançando  $R^2 = 0,84$ . Em Passo Real, por sua vez, apresentou melhores ajustes na derivada de segunda ordem e TSS, obtida a partir da maior correlação inversa entre estes. A modelo ajustado entre a derivada de segunda ordem e o TSS em 759, comprimento de onda no qual se obteve maior correlação, resultou em  $R^2 = 0,45$ . A primeira derivada e o TSS foi ajustado em 764 nm e alcançou  $R^2 = 0,56$ .

O terceiro objetivo desta pesquisa foi o de *avaliar se os modelos gerados possuem aplicação nas duas áreas de estudo*, no qual foi encontrado um modelo no qual se obteve resultados satisfatórios nas duas áreas, onde se utilizou os dados da segunda derivada e do TSS em 777 nm em Curuai, alcançando  $R^2 = 0,74$  e em 757 nm em Passo Real, modelo que obteve  $R^2 = 0,71$ .

O quarto objetivo, o de *simular os espectros de reflectância com imagens do Sensor da Missão Sentinel-2*, foi proposto a fim de explorar a eficiência das bandas do Sentinel-2 nas duas áreas de estudo, para, se possível, em futuras pesquisas, as imagens deste sensor possam ser utilizadas como parâmetro para análise da água nas áreas de estudo. A simulação das bandas centrais do Sentinel-2 foi realizada, basicamente, para experimentação e respaldo para a continuidade da pesquisa.

- O quinto objetivo dá sequência ao quarto, sendo este “*verificar a eficiência dos modelos empíricos gerados a partir da simulação dos espectros do Sentinel-2 para a identificação dos constituintes e características dos corpos d’água*”, e apresentou melhores resultados com os dados espectrais do Lago Grande do Curuai, uma vez que o TSS apresentou média menor de concentração na UHE Passo Real (6,07 mg/L), comparado ao Lago Grande do Curuai (33,44 mg/L). Além disso a média de TSS em Passo Real pode não ter apresentado concentração suficiente para ser registrada pelo sensor. Apesar da diferença de valores de  $R^2$  em Passo Real e Curuai, as bandas do MSI/Sentinel-2 mostraram-se eficientes, uma vez que, por se tratar de uma imagem multiespectral, apresentou feições bem marcadas nos dois espectros.

O sexto e último objetivo, por sua vez, apresenta a síntese deste trabalho que é o de comparar *as análises da água nas duas áreas de estudo a fim de identificar semelhanças e diferenças*, sendo satisfatório, pois, mesmo sendo áreas diferentes em muitos aspectos, foi possível detectar modelos eficientes para as duas áreas.

## 8 CONCLUSÕES

Esta pesquisa estabeleceu como objetivo principal comparar os espectros de reflectância do Lago Grande do Curuai e da UHE Passo Real e relacionar suas assinaturas espectrais com a variável TSS. Para realizar esta comparação de forma mais eficiente, os espectros foram agrupados segundo suas formas, nas duas áreas de estudo, em três classes de espectro, nas quais foram analisadas separadamente. Os modelos ajustados mostraram-se satisfatórios quanto ao TSS, na região do infravermelho próximo, com resultados de  $R^2$  próximos a 0,70, indicando que mais de 70% da assinatura espectral de cada área de estudo está sob influencia do TSS. Diante disso, o ajuste de modelos de regressão a partir das derivadas de segunda ordem nos comprimentos de onda de maior correlação é eficiente para verificar a atuação do TSS nas duas áreas de estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**: 2013. Brasília: ANA, 2013. Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite\\_relatorioConjuntura/projeto](http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite_relatorioConjuntura/projeto). Acesso em 21/06/2016.

ASD (Analytical Spectral Devices, Inc.). **FieldSpec HandHeld Spectroradiometer**: User's Guide, 2003. Disponível em: <http://www2.fct.unesp.br/docentes/carto/enner/PPGCC/Hiperespectral/Espectrorradiometro%20-%20Manuais%20-%20Campo/600300%20FieldSpec%20HandHeld%20Manual.PDF>. Acesso em 16/05/2016.

AUGUSTO-SILVA, P. B. **Caracterização e avaliação da dinâmica sazonal das propriedades bio-ópticas do reservatório de funil com apoio de sensoriamento Remoto, dados in situ e modelos ópticos**. Dissertação de Mestrado. INPE: São José dos Campos, 2013.

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento Remoto na Dinâmica da Circulação da Água do Sistema Planície de Curai/Rio Amazonas**. Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos, 2007.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística**: Princípios e Aplicações. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CEEE – GT (Companhia Estadual de Geração de Energia Elétrica – Geração e Transmissão). **Plano de uso e ocupação do solo no entorno do reservatório da UHE Passo Real**. Porto Alegre: PROFFIL, 2009.

CLARK, R. N.; ROUSH, T. L. Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications. **Journal of Geophysical Research**, 1984, v. 89, n. B7, 6329–6340.

DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. Amsterdam, 1993. p.260, PhD theses, Free University, Amsterdam, 1993.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Sentinel online**. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>> Acesso: Agosto de 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, RJ. **Caracterização dos solos da área do planalto de Se/terra, município de Santarém, Estado do Pará** / Tarcísio Ewerton Rodrigues et al. - Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001, 55p.

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FAGA, B.R. et. al. Estimativa da concentração de sólidos suspensos e clorofila-a no Rio Bonito (SP): ajuste de modelos empíricos baseados na análise derivativa. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa, 2015.

FERREIRA, R. D. **Dados fluorométricos e espectrais aplicados à estimativa da concentração de clorofila na planície de Curuai / Rio Amazonas**. Dissertação de Mestrado. INPE: São José dos Campos, 2012.

GOODIN, D. G. et al. Analysis of Suspended Solids in Water using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra. **Photogramm. Engineering Remote Sensing**. v.59, n.4, p.505–510, 1993.

CICERELLI, R. E., GALO, M. L.D. T. Sensoriamento remoto multifonte aplicado na detecção do fitoplâncton em águas interiores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e ambiental**. Campina Grande, v. 19 n.3. p. 259-265. Março de 2015.

HAN, L. Spectral Reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and Algae-Laden waters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. Tuscaloosa, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/>. Acesso em: 25/08/2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades**. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=> Acesso em 17/05/2016.

INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA. Mapa. **Desmatamento e degradação Florestal em Santarém – Pará. 2000 – 2013**. Centro de Geotecnologia do IMAZON. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Estações e Dados. **Dados em gráficos**. Disponível em: [http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_conv\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_conv_graf). Acesso em 02/05/2016.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

KAMPEL, M.; NOVO, E. M. L. M. **O sensoriamento remoto da cor da água**. In: SOUZA, Ronald Buss (Ed.). Oceanografia por satélites. v. Cap. 12, p. 179-196. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

KIRK, J. T. O. **Light and Photosynthesis in aquatic ecosystems**. 3 ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

KOSUTH, P. Hydrological dynamics of the varzea of Lago Grande do Curuai: water and sediment balance, influence of river stage. In: **LBA 2nd International Conference**, Julho 2002 Manaus. Manaus: LBA, 2002.

- KRUSE *et al.* F. A. The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of images spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 44, p. 145-163, 1993.
- KUTSER, T. *et al.* Field Measurements of spectral backscattering coefficient of the Baltic Sea and boreal lakes. **Boreal Environment Research**. V. 14. Helsinki, 2009.
- MARTINEZ, J.M *et al.* Application of remote sensing data for the quantification of an Amazon floodplain extension, dynamics and water storage. **Geophysical Research Abstracts**, 2003.
- MAURICE-BOURGOIN, L *et al.* Tracing Of The Hydrological Dynamics Of An Amazonian Floodplain . In: **IV South American Symposium on Isotope Geology**.4, 2003, Salvador. **Anais Salvador: IDR**, 2003, p.453-456.
- MATTHEWS, M. W. **A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters**. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 32, No. 21, 10 November 2011, 6855–6899.
- MENESES, P. R., NETTO, José da Silva Madeira. (orgs.) **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos alvos naturais**. NOVO, Márcia Leão de Moraes. *Comportamento Espectral da água*. UNB EMBRAPA: Brasília, 2001.
- MOBLEY, C. D. **Light and water: radiative transfer in natural waters**. San Diego: Academic Press, 1994.
- MONTANHER *et al.* Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. n. 29, p. 67-77. 2014.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 3 ed. Viçosa: UFV, 2005.
- MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**, v. 22, p. 709-722, 1977.
- NOVO, Evelyn M. L. **Sensoriamento Remoto: Princípios e aplicações**. 2 ed. Edgard Blücher: São Paulo, 1992
- PAULA, M.R. **Relações entre variáveis limnológicas e reflectância do Reservatório Passo Real – RS**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria, 2015.
- PRADO, D. **Comparação de variáveis limnológicas em dois reservatórios do Rio Jacuí no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

PORTAL AMBIENTE BRASIL. **Águas Doces/artigos**. Disponível em: <[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agua/artigos\\_agua\\_doce/avaliacao\\_da\\_qualidade\\_da\\_agua.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agua/artigos_agua_doce/avaliacao_da_qualidade_da_agua.html)>. Acesso em: 03/04/2016.

PREISENDORFER, R.W. (1961). Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea. **Union Geod. Geophys. Inst. Monogr.**, 10, 11–30.

ROTTA, L. H. S. et al. Desenvolvimento de modelos empíricos para a estimativa da concentração de clorofila-*a* e do total de sólidos em suspensão no reservatório de Nova Avanhandava (SP), baseados nos coeficientes de absorção e retroespalhamento. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa, 2015.

ROTTA, L. H. S. et al. Estimativa da concentração de sólidos suspensos e clorofila-*a* no Rio Bonito (SP): ajuste de modelos empíricos baseados na análise derivativa. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa, 2015.

RUDORFF, C. M. et al. Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 1. Hydraulic controls on water elevation, inundation extent, and river-floodplain discharge. **Water Resources Research**. Vol. 50, p. 619–634, 2014. Disponível em: 10.1002 / 2013WR014091. Acesso em: 12/09/2016.

RUNDQUIST, D. C. Remote Measurement of Algal Chlorophyll in Surface Waters: The Case for the First Derivative of Reflectance Near 690 nm. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 62, no. 2, 1996, p. 195-200. Disponível em: <http://www.calmit.unl.edu/people/drundquist1/pdf/1996/Rundquist%201996%2062-2-195-200.pdf>

SANTOS, F. C. **Influências dos Constituintes Opticamente ativos na reflectância espectral da água do reservatório Passo Real, RS**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SIOLI, H. Remark on the typology of Amazonian rivers. **Revista Amazoniana**. V. 1 (1) p. 74 – 83, 1968.

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

TONIOLO, G. R. **Identificação de constituintes opticamente ativos na água do Lago Guaíba, a partir de dados de sensores orbitais e espectrorradiometria de campo**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

TRENTIN, A. **Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo do comportamento espectral da água no reservatório Passo Real – RS**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria, 2009.



TriOS OPTICAL SENSORS (TRIOS) – RAMSES: **hyperspectral radiance and irradiance sensors for the UV, VIS or UV/VIS range.** Disponível em: [http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html?tx\\_cccascatalog\\_catalog%5Bpdf%5D=1](http://www.trios.de/en/products/sensors/ramses.html?tx_cccascatalog_catalog%5Bpdf%5D=1). Acesso em: 15/06/2016

VALÉRIO, A. M. KAMPEL, M. STECH, J.L. Aplicação da técnica SAM (Spectral Angle Mapper) para dados hiperespectrais do corpo de água do reservatório de Manso, MT. **Anais. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** Natal, 2009. Disponível em <http://mart.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.04?mirror=dpi.inpe.br/banon/2003/12.10.19.30.54&metadatarpository=dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.04.27>.

WACHHOLZ, Flávio. **Influência da bacia hidrográfica e características espaço-temporais de variáveis limnológicas sobre reservatórios no Rio Jacuí - RS.** 2011. 196 f. Tese - (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/104345>>.

WATANABE, F. S. Y. **Estudo da influência da coluna d'água na resposta espectral da vegetação aquática submersa em condições controladas.** Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista: Presidente Prudente, 2012.