

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**DADOS MODIS E LANDSAT-8 PARA ANÁLISE
DA ÁGUA DA LAGOA DOS PATOS, RS**

Alice César Fassoni de Andrade

PORTO ALEGRE
RIO GRANDE DO SUL - BRASIL
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**DADOS MODIS E LANDSAT-8 PARA ANÁLISE
DA ÁGUA DA LAGOA DOS PATOS, RS**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto para obtenção
do Título de Mestre em Sensoriamento
Remoto

Área de Concentração: Sensoriamento
Remoto aplicado.

Alice César Fassoni de Andrade

Orientador: Laurindo Antonio Guasselli

Co-Orientador: Daniel Capella Zanotta

PORTO ALEGRE
RIO GRANDE DO SUL - BRASIL
2016

CIP - Catalogação na Publicação

Fassoni-Andrade, Alice César

Dados MODIS e Landsat-8 aplicados para análise da água da Lagoa dos Patos, RS / Alice César Fassoni-Andrade. -- 2016.

65 f.

Orientador: Laurindo Antonio Guasselli.

Coorientador: Daniel Capella Zanotta.

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

1. Componentes opticamente ativos. 2. Estimativa. 3. Série temporal. 4. Modelo linear de mistura espectral. 5. Timesat. I. Guasselli, Laurindo Antonio, orient. II. Zanotta, Daniel Capella, coorient. III. Título.

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alice César Fassoni de Andrade

Dados MODIS e Landsat-8 para análise da água da Lagoa dos Patos, RS

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto para obtenção
do Título de Mestre em Sensoriamento
Remoto

Área de Concentração: Sensoriamento
Remoto aplicado.

Aprovada em 1 de março de 2016:

Prof. Dr. Glauber Acunha Gonçalves – FURG

Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira – UNIVATES

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva – UFRGS

Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli – UFRGS
(Orientador)

Prof. Dr. Daniel Capella Zanotta – IFRS/Rio Grande
(Co-Orientador)



Pôr do sol na Lagoa dos Patos [25 de fevereiro de 2015]

“A Lagoa dos Patos deve seu nome aos índios da Tribo dos Patos, que, antigamente, moravam nesta região”

Herrmann Von Ihering
Die Lagoa dos Patos, Alemanha, 1885.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela esperança de vida hoje e amanhã.

Ao André, pelo apoio e paciência. Obrigada por sempre se fazer presente com sua alegria.

Aos meus pais e irmãos, pelas conversas que indiretamente contribuíram para a realização do mestrado.

Ao prof. Laurindo Guasselli, pela orientação, críticas e sugestões construtivas em boas conversas.

Ao prof. Daniel Zanotta, pela orientação, apoio e discussões relativas ao modelo de mistura.

Aos professores Cláudio, Glauber, Guilherme e Rodrigo pelos comentários e sugestões.

Ao prof. Glauber, ao Gustavo e ao Wagner, juntamente com a tripulação da lancha Larus, por tornarem possível a realização da primeira campanha de campo.

Ao Geovane e aos professores Daniel e Jean, pelo apoio essencial na segunda campanha.

Ao prof. Éder e à Rose, pela amizade e recepção em Rio Grande.

À prof^a. Virgínia Tavares e à Fabiane, pelo apoio nas análises de clorofila-a no Laboratório de Ecologia do Fitoplâncton e de Microrganismos Marinhos da Universidade Federal do Rio Grande.

À Maria José e ao Gilberto, pela disposição e ajuda nas análises das amostras no Laboratório de Ecologia e no Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, ambas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aos colegas de mestrado, pela amizade e discussões. Em especial à Adriana, ao Gustavo, ao Diniz, à Virindiana, ao Luís, ao Mauro e ao Thiago.

À profa. Rita, que me recebeu no início do mestrado, pelo apoio.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta dissertação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e a CAPES, pela bolsa de estudo em nível de pós-graduação.

RESUMO

FASSONI-ANDRADE, Alice César Fassoni, MSc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Março de 2016. **Dados MODIS e Landsat-8 para análise da água da Lagoa dos Patos, RS.**

Imagens adquiridas por sensores orbitais possibilitam observações da Terra e auxiliam estudos de grande áreas. Este trabalho utilizou imagens orbitais para analisar os componentes que modificam as características óticas da água na Lagoa dos Patos, localizada no sul do Brasil. A partir de imagens multiespectrais dos sensores MODIS/Terra e OLI/Landsat-8, foi possível avaliar a variação espaço-temporal de sólidos em suspensão (SS) e estimar alguns parâmetros de qualidade da água na Lagoa dos Patos. Na primeira etapa desse trabalho, o padrão anual e espacial de SS na laguna foi determinado com base em uma série de 15 anos do produto MOD09Q1 (reflectância na faixa do vermelho do sensor MODIS). Foi observado que a reflectância possui um padrão sazonal com aumento do outono até o final da primavera, e que no corpo lagunar e no estuário a reflectância varia ao longo do ano. Interpretações da variação da reflectância, relacionadas a descarga fluvial e a ação dos ventos, foram apresentadas. Na segunda etapa desse trabalho, o modelo linear de mistura espectral (MLME) foi aplicado em uma imagem do sensor OLI para separar águas espectralmente distintas do estuário da Lagoa dos Patos. A partir das imagens frações, geradas pelo MLME, e das bandas do sensor OLI e TIRS modelos empíricos foram desenvolvidos para estimar alguns parâmetros de qualidade da água. Os modelos obtidos foram capazes de estimar a concentração de clorofila-a ($R^2 = 0,82$) e de sólidos em suspensão ($R^2 = 0,62$), a turbidez ($R^2 = 0,67$) e a profundidade do disco Secchi ($R^2 = 0,64$). Conclui-se que o MLME e os dados do satélite Landsat-8 apresentam grande potencial para estimativa de parâmetros da água por imagens orbitais.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Estuário, Estimativa, Sólidos em Suspensão, Série temporal, Timesat, Modelo Linear de Mistura Espectral.

ABSTRACT

FASSONI-ANDRADE, Alice César Fassoni, MSc.. Federal University of Rio Grande do Sul, March 2016. **MODIS and Landsat-8 for water analysis of the Patos Lagoon, Brazil.**

Images acquired by orbital sensors enable observations of the Earth and assist studies of large areas. This work used orbital images to analyze the components that modify the optical characteristics of the water of Lagoa dos Patos, located in the southern region of Brazil. By using multispectral images from MODIS/Terra and OLI/Landsat-8 sensors it was possible to evaluate the spatio-temporal variation of suspended solids (SS) and estimate some parameters of water quality. In the first stage of this work, the annual and spatial pattern of SS were estimated based on a series of 15 years of MOD09Q1 product (reflectance in the red channel of MODIS sensor). It was observed that the reflectance has a seasonal pattern with increase in the autumn until the late spring, and that in the lagoon body and estuary the reflectance varies throughout the year. Interpretations of the spatio-temporal variation of reflectance related to river discharge and the action of the winds were presented. In second stage of this study, the Linear Spectral Mixing Model (LSMM) was applied to an image of the OLI sensor to separate spectrally distinct waters of Lagoa dos Patos estuary. From the fraction images generated by LSMM and the bands of OLI and TIRS sensors, empirical models were developed to estimate some parameters of water quality. The obtained models were able to estimate the concentration of chlorophyll ($R^2 = 81,56$) and the suspended solids ($R^2 = 61,57$), turbidity ($R^2 = 67,14$) and Secchi disk depth ($R^2 = 64,29$). Combination of LSMM and the Landsat-8 satellite have shown great potential for water parameters estimation from orbital images.

Keywords: Remote Sensing, Estuary, Estimate, Suspended Solids, Timesat, Linear Spectral Mixing Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Origens do fluxo de radiação detectado por um sensor remoto acima de um corpo de água (Adaptado de Kirk, 2011).....	17
Figura 1. 2: Fator de Reflectância Bidirecional da água com concentrações variáveis de MOD (Adaptado de Mantovani, 1993).....	19
Figura 1. 3: Reflectância espectral da água clara e de água com algas (Adaptado de Jensen, 2009).....	19
Figura 1. 4: Reflectância espectral da água com concentrações variáveis de 0 a 1000 mg/l de (a) argila e (b) silte (Adaptado de Jensen, 2009).....	20
Figura 2. 1: a) Rio Grande do Sul, Brasil; b) Lagoa dos Patos.....	25
Figura 2. 2: a) Desvios mensais para a série de descarga fluvial dos rios Jacuí e Taquari (01/1940 a 12/2002); b) Desvios mensais da série de velocidade dos ventos no Chuí (01/1964 a 12/1999). Os valores positivos representam os ventos provenientes de quadrante sul e valores negativos do quadrante norte.....	26
Figura 2. 3: Representação do comportamento dinâmico da Lagoa dos Patos quando atuam ventos: a) sudoeste e b) nordeste. A linha fina representa o nível caso a Lagoa fosse fechada em ambas as extremidades (Adaptado de Möller <i>et al.</i> 2001).....	27
Figura 2. 4: Espectro temporal do produto MOD09Q1 entre outubro de 2000 e novembro de 2015. Imagens brutas (curva em preto) e filtradas (curva em vermelho).	29
Figura 2. 5: a) Reflectância média ao longo do ano; b) Taxa de variação da reflectância com o tempo. Série de out/2010 a nov/2015) nos pontos: 1) Rio Guaíba, 2) norte e 3) sul da Lagoa dos Patos, 4) Canal São Gonçalo e 5) estuário.....	30
Figura 2. 6 Imagens de reflectância média mensal do produto MOD09Q1.....	32
Figura 2. 7: Transectos longitudinais das médias mensais da reflectância normalizada, do Rio Guaíba até o estuário da Lagoa dos Patos entre: a) janeiro e abril; b) maio e agosto; e c) setembro a dezembro.	34
Figura 2. 8: Diferença entre a reflectância entre um ponto ao norte e outro ao sul da Lagoa dos Patos e direção predominante do vento ao longo do ano.	35
Figura 2. 9: Transectos verticais das médias mensais da reflectância no norte (A) e no sul (B) do corpo lagunar entre: a) janeiro e abril; b) maio e agosto; e c) setembro e dezembro.....	37

Figura 3. 1:a) Rio Grande do Sul, Brasil; b) Lagoa dos Patos; c) Estuário da Lagoa dos Patos.....	43
Figura 3. 2: Exemplo de simplex para o caso de 3 endmembers.....	47
Figura 3. 3: a) Curvas espectrais dos endmembers identificados. Imagem em composição RGB cor verdadeira (432) do estuário da Lagoa dos Patos. Localização dos endmembers: b) Água com baixa concentração de sólidos em suspensão (SS); Água com matéria orgânica dissolvida (MOD) e Água com areia de fundo (ARE); c) Água clara (AC).	50
Figura 3. 4: a) Imagem em composição RGB cor verdadeira (432) do estuário da Lagoa dos Patos; Imagens em termos de abundância fracionais (0-1): b) frSS; c) frARE; e d) frMOD.	51
Figura 3. 5: a) Imagem em composição RGB cor verdadeira (432); resíduos estimados: b) banda 1; c) banda 2; d) banda 3; e) banda 4.	52
Figura 3. 6: Regressões lineares simples e múltiplas para estimativa de: a) Chl-a; b) TSS; c) Turbidez; e d) Profundidade do DS.	55
Figura 3. 7: Mapeamento de concentração: a) Chl-a ($\mu\text{g/l}$); b) TSS (mg/l); c) Profundidade do DS (cm).	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1: Estatística descritiva dos parâmetros analisados para as 19 estações amostrais no estuário da Lagoa dos Patos.	48
Tabela 3. 2: Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros analisados e a reflectância das bandas espectrais	49
Tabela 3. 3: Estatística dos modelos de estimativa de Chl-a e TSS (n = 19).....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Água clara
ARE	Água com areia de fundo
Chl-a	Clorofila-a
COAs	Componentes opticamente ativo
DS	Disco de Secchi
frAREIA	Imagem fração de areia
frMOD	Imagem fração de matéria orgânica dissolvida
frSS	Imagem fração de sólidos em suspensão
MLME	Modelo linear de mistura espectral
MOD	Matéria orgânica dissolvida
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NE	Nordeste
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez
OLI	Operational Land Imager
QA	Quality Assurance
REM	Radiação eletromagnética
SS	Sólidos em suspensão
SO	Sudoeste
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TSS	Total de sólidos em suspensão
USGS	U. S. Geological Survey
Z	Zona eufótica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: Introdução.....	14
1.1. Apresentação.....	14
1.2. Contexto científico	14
1.3. Objetivos	16
1.4. Sensoriamento remoto da água.....	16
1.4.1. Fluxos de radiação detectados por um sensor remoto.....	17
1.4.2. Interação da radiação com os componentes da água	18
1.4.3. Limitações dos sensores orbitais	20
CAPÍTULO 2: Utilização de dados MODIS para caracterização do padrão anual de sólidos em suspensão na Lagoa dos Patos	22
2.1. Introdução.....	23
2.2. Área de estudo	24
2.3. Materiais e Métodos	28
2.3.1. Pré-processamento dos dados MODIS	28
2.3.2. Padrão temporal	28
2.3.3. Padrão espacial	29
2.4. Resultados e discussão	29
2.4.1. Pré-processamento.....	29
2.4.2. Padrão temporal	30
2.4.3. Padrão espacial.....	34
2.5. Conclusões.....	37
Referências.....	38
CAPÍTULO 3: Estimativa de parâmetros de qualidade da água no estuário da Lagoa dos Patos por meio de dados Landsat-8	41
3.1. Introdução.....	42

3.2.	Modelo linear de mistura espectral	44
3.3.	Materiais e Métodos	45
3.3.1.	Levantamento de dados de campo e análise em laboratório .	45
3.3.2.	Dados da imagem Landsat-8.....	45
3.3.3.	Aplicação do MLME	46
3.3.4.	Estimativa dos parâmetros	47
3.4.	Resultados e discussão	47
3.4.1.	Correlação entre os parâmetros e dados do Landsat-8	47
3.4.2.	Imagens fração do MLME	49
3.4.2.1.	Seleção dos <i>endmembers</i>	49
3.4.2.2.	Mapeamento em termos de abundância fracional	51
3.4.2.3.	Análise do resíduo do modelo de mistura	52
3.4.3.	Estimativa e mapeamento dos parâmetros	53
3.5.	Conclusões	56
	Referências.....	57
CAPÍTULO 4: Considerações finais		61
	Referências	62

CAPÍTULO 1: Introdução

1.1. Apresentação

Esta dissertação analisou, por meio de imagens orbitais, os componentes que alteram as características óticas da água da Lagoa dos Patos com o objetivo de ampliar o conhecimento e as informações disponíveis acerca desse local e de métodos de sensoriamento remoto aplicado às águas interiores.

A estrutura deste estudo é dividida em quatro capítulos. O primeiro capítulo possui caráter introdutório, apresentando o contexto científico, os objetivos propostos e uma breve revisão teórica sobre os fluxos de radiação na água, as interações com os componentes presentes na água e limitações dos sensores orbitais.

O segundo e o terceiro capítulo tratam, respectivamente, da variação espaço-temporal da reflectância na faixa do vermelho do sensor MODIS/Terra e da estimativa de alguns parâmetros de qualidade da água no estuário da Lagoa dos Patos. O primeiro faz uso de uma série temporal de 15 anos de imagens do produto MOD09Q1, que responde pela concentração de sólidos em suspensão na superfície. E o segundo, faz uso do modelo linear de mistura espectral (MLME), aplicado em uma imagem do sensor OLI/Landsat-8, para utilização em modelos empíricos e estimativa de parâmetros de qualidade da água. O quarto capítulo apresenta as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

1.2. Contexto científico

A Lagoa dos Patos, localizada no sul do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, é a maior laguna do mundo (Kjerfve, 1986) com uma área de 10.227 km², profundidade média de 5 m e eixo principal de 180 km, que se estende na direção NE-SO (Asmus, 1998). O Oceano Atlântico está conectado com o sul da laguna por um único canal formando uma área estuarina que representa 10% da área total (Möller e Fernandes, 2010). Possui uma bacia de drenagem de aproximadamente 201.626 km² (Asmus, 1998), recebendo água das bacias do Guaíba, Camaquã e da Lagoa Mirim, pelo Canal São Gonçalo.

A laguna possui uma grande importância ambiental, econômica e social no contexto regional. É utilizada como rota de navegação entre as cidades de Porto Alegre e Rio Grande, onde está localizado o importante porto de Rio Grande. Sua área estuarina possui elevada produtividade, diversidade de fauna e flora, e muitos nichos

alimentares para animais herbívoros, carnívoros e detritívoros (Tundisi, 2008), sendo uma importante zona para a pesca artesanal (Baumgarten *et al.*, 1995). O conhecimento da hidrodinâmica e da composição da água é de grande relevância para estudos e ações relacionadas a impactos ambientais e atividades econômicas.

Modelos numéricos foram utilizados para compreender a hidrodinâmica da laguna com períodos ou cenários específicos (Möller *et al.*, 1996; Möller *et al.*, 2001; e Castelão e Möller 2003). Esses trabalhos mostram que a circulação está associada a ação dos ventos e a descarga fluvial, sendo que as oscilações de maré exercem pouco influencia. Apesar do avanço em relação ao entendimento da circulação da laguna, poucos estudos abordam a variação espaço-temporal da composição da água, mais especificamente de sólidos em suspensão. Estes são restritos à escalas locais, como ao estuário (Hartmann e Schettini, 1991; Hartmann, 1996; Ávila, 2013) e ao Rio Guaíba (Nicolodi *et al.* 2010; Andrade-Neto, 2011; Kirchhof, 2015). Poucos estudos abordam toda a laguna (Pereira, 2003) devido a incapacidade de amostragens sistemáticas neste grande corpo d'água.

Imagens de sensoriamento remoto na faixa do visível do espectro eletromagnético tem se tornado uma alternativa para auxiliar estudos de rios, lagos, estuários e reservatórios. Esses dados fornecem uma visão sinóptica e possibilitam análise de séries temporais. Alguns exemplos de aplicação de técnicas de sensoriamento remoto são: Estimativa da clorofila (Yacobi *et al.*, 2011) e de séries históricas de dados de concentração de sólidos em suspensão (Villar *et al.*, 2012; Montanher *et al.*, 2014); Mapeamento de florações de algas (Kutser, 2004); Estudo da recarga hidrológica em região de Delta (Long e Pavelsky, 2013); Avaliação de plumas de sólidos em suspensão (Shi e Wang, 2009; Mendes *et al.*, 2014); e observação de derramamento de óleo (Kim *et al.*, 2015).

As estimativas de componentes da água por meio de imagens orbitais são elaboradas, normalmente, por relações empíricas entre as bandas do sensor e dados *in situ*. Essas relações dependem das características dos componentes e da faixa espectral do sensor (Montanher, 2013). Entretanto, há limitações metodológicas para estas estimativas, como por exemplo, a discriminação dos espectros dos componentes. Alternativas metodológicas são utilizadas para melhorar as relações empíricas, como a aplicação do modelo linear de mistura espectral (MLME) (Bajjouk *et al.*, 1998), que é um mapeamento em nível subpixel, e a derivação do espectro (Rudorff, 2006), que ressalta a resposta de um componente em relação à outro. Ambas técnicas são mais comumente aplicadas em dados de sensores hiperespectrais devido ao maior número de bandas.

A extensão da Lagoa dos Patos favorece à utilização de dados de sensoriamento remoto, mas aplicações neste local ainda são incipientes. Na década de 80, dados

orbitais foram utilizados para compreender a circulação das águas (Herz, 1977), interpretar a dinâmica das massas de água ou sólidos em suspensão (Hartmann, 1988; Hartmann, 1996), e ainda, estimar os parâmetros de qualidade da água por sensores orbitais (Mendes, 1990). O foco de estudos mais recentes tem sido voltado para a dinâmica de organismos fotossintetizantes, como Lobo *et al.* (2009), que mapearam áreas propensas a florações de cianobactérias em uma região de enseada do estuário, E Jorge (2013), que identificou florações de fitoplâncton na laguna utilizando imagens do MODIS/Aqua e SeaWiFS. Gianasi *et al.* (2011) avaliaram o comportamento espectral da água e da vegetação aquática submersa em uma pequena região do estuário da Lagoa dos Patos, com fluxos lentos. Zanotta *et al.* (2010) avaliaram a distribuição espacial da temperatura superficial a partir de médias mensais (ciclo anual) de dados NOAA/AVHRR.

1.3. Objetivos

O objetivo geral deste estudo é compreender o padrão espaço-temporal anual de sólidos em suspensão e estimar alguns parâmetros de qualidade da água na Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, utilizando dados de sensoriamento remoto. Os objetivos específicos são:

- Compreender o padrão espaço-temporal anual de sólidos em suspensão na utilizando dados do sensor MODIS/Terra;
- Compreender os fatores que governam a hidrodinâmica, como a ação do vento e a descarga fluvial, e provocam variação de sólidos em suspensão;
- Avaliar o modelo linear de mistura espectral (MLME) sobre imagens do sensor OLI/Landsat-8 para mapear, em termos de abundância fracional, águas do estuário espectralmente distintas;
- Estimar a concentração de sólidos em suspensão, clorofila-a, turbidez e profundidade do disco de Secchi no estuário a partir de relações empíricas entre imagens frações/bandas do sensor e dados de concentração medidos *in situ*;
- Avaliar o desempenho do MLME e dados do satélite Landsat-8 para aplicações em águas interiores.

1.4. Sensoriamento remoto da água

Essa seção busca contextualizar como o sensoriamento remoto pode ser usado para recuperar informações relacionadas aos componentes da água. Para isso, é importante o entendimento dos fluxos de radiação que deixam o corpo d'água sendo

detectado por um sensor remoto, e as interações da radiação com os componentes presentes na água. Posteriormente, são elucidadas algumas limitações dos sensores orbitais para este tipo de aplicações.

1.4.1. Fluxos de radiação detectados por um sensor remoto

A radiação registrada por um sensor remoto orbital pode ser originária de quatro fontes (Jensen, 2009; Kirk, 2011), indicadas na Figura 1.1.

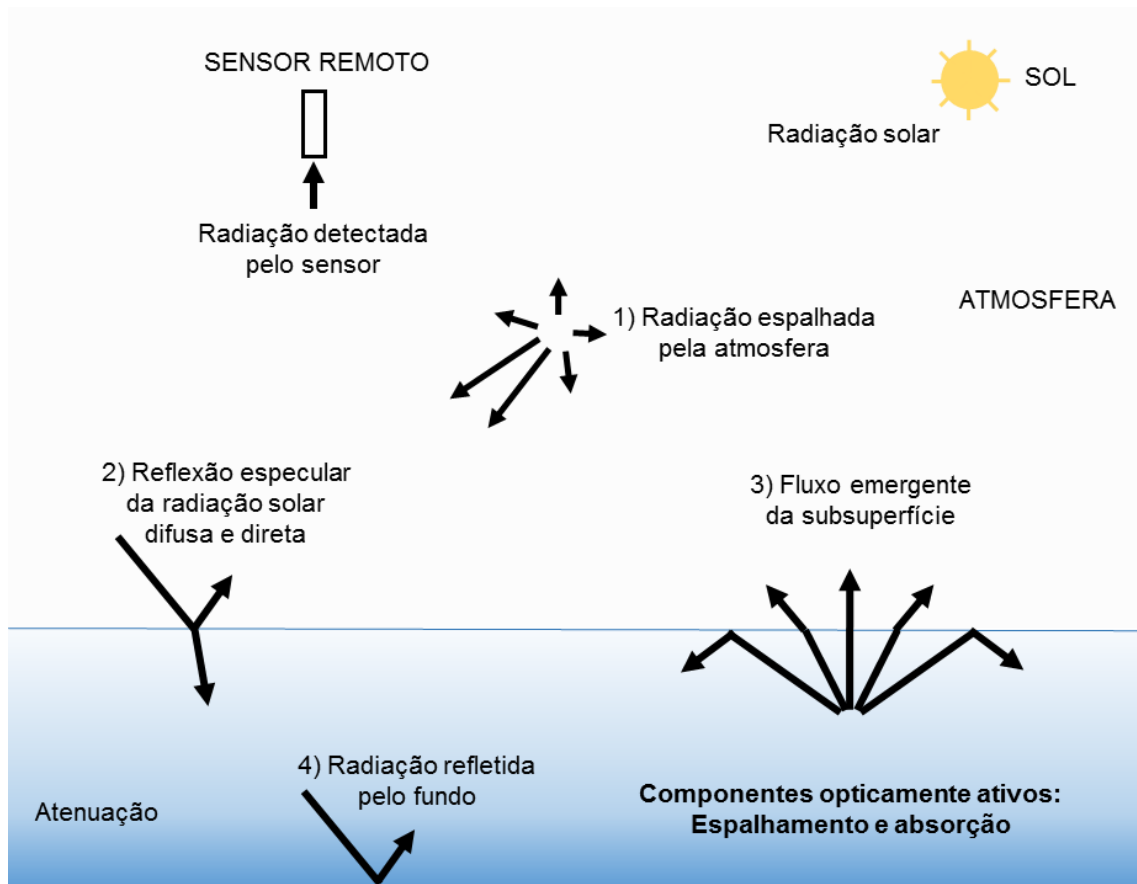


Figura 1.1: Origens do fluxo de radiação detectado por um sensor remoto acima de um corpo de água (Adaptado de Kirk, 2011).

1) Radiação espalhada pela atmosfera: É a porção que não atinge a superfície da água sendo espalhada na atmosfera. Cerca de 80 a 90% da radiação detectada sobre um corpo d'água sofre o efeito de espalhamento atmosférico de *Reyleigh*, provocado pela presença de aerossóis e gases (Kirk, 2011). A região de maior penetração de luz na água (400 e 500 nm) é a mais afetada pelo efeito de espalhamento. Existem diversas técnicas de correção atmosférica, realizada nas imagens, para atenuar ou remover esse efeito;

2) Reflexão especular da radiação direta e difusa: Ocorre quando a irradiância solar (direta) e/ou atmosférica (difusa) alcança a interface ar-água e é essencialmente refletida. Se o ângulo de visada do sensor e o ângulo zenital solar forem próximos, a reflexão puramente especular da superfície pode dominar a radiação registrada pelo sensor. Esse efeito, chamado *sunlint*, também pode ocorrer quando a superfície da água possui ondulações;

3) Fluxo de radiação emergente da subsuperfície da água: Traz informações sobre a composição da coluna d'água. A radiação solar e atmosférica penetra na interface ar-água, interage com a água e seus componentes, alterando sua natureza, e então emerge da coluna d'água. Parte da radiação não atravessa a interface ar-água e é refletida para baixo, devido à diferença de densidade óptica. O fluxo de radiação que atravessa a interface sofre refração (lei de Snell), ocupando um ângulo sólido maior e perdendo a intensidade. Essa é a radiação de maior interesse para recuperação de informações da composição da água.

4) Radiação proveniente da reflexão do fundo. As propriedades do fundo podem ser recuperadas em águas com alta transparência e/ou rasas. Isso é desejável para execução de mapeamentos batimétricos ou de recifes de corais, mas é indesejável quando se deseja recuperar informações da coluna d'água. A Lagoa dos Patos é rasa e apresenta bancos de areia nas margens que prejudicam a recuperação dos seus componentes.

1.4.2. Interação da radiação com os componentes da água

O fluxo de radiação que atravessa a interface ar-água sofre absorção ou espalhamento ao longo da coluna d'água pelos componentes presentes. O resultado é a alteração no feixe de radiação de forma seletiva ou quantitativa, cuja composição espectral e intensidade estão associadas à composição da água (Novo, 2001). Assim, a partir da cor da água e conhecendo os efeitos de absorção e espalhamento provocados pelos componentes na água, é possível inferir algumas propriedades como o tipo, a composição e a concentração dos componentes presentes.

Os principais componentes que afetam a absorção e o espalhamento da água são os sólidos em suspensão (SS), a matéria orgânica dissolvida (MOD) e os pigmentos fotossintetizantes, como a clorofila-a (Chl-a) (Novo, 2001; Jensen, 2009; Kirk, 2011).

A MOD, caracterizada por apresentar principalmente ácidos húmicos e fúlvicos, possui elevada absorção da radiação eletromagnética (REM) em comprimentos de onda menores, decrescendo quase exponencialmente até valores muito baixos em 700 nm (vermelho) (Mantovani, 1993). Essas substâncias alteram a cor dos corpos d'água para

colorações mais escuras e amareladas. A Figura 1.2 mostra a reflectância da água com diferentes concentrações de MOD onde, com o aumento da concentração, a absorção da REM aumenta até próximo de 700 nm.

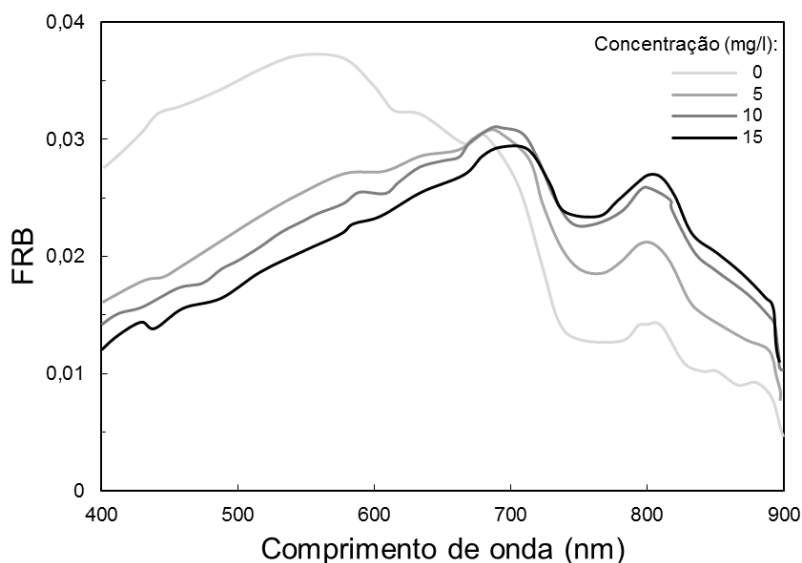


Figura 1. 2: Fator de Reflectância Bidirecional da água com concentrações variáveis de MOD (Adaptado de Mantovani, 1993).

A Chl-a, pigmento presente em organismos aquáticos, como o fitoplâncton e as algas, possui duas regiões de absorção: entre 400 a 500 nm (faixa do azul) e próximo de 670 nm (vermelho), e uma região de máxima energia refletida na faixa do verde (550 nm) (Jensen, 2009). Além disso, há um pico acentuado de reflectância em torno de 690 nm associado à energia refletida pela fluorescência da Chl-a (Novo, 2001). A Figura 1.3 exemplifica as regiões de absorção e de máximo.

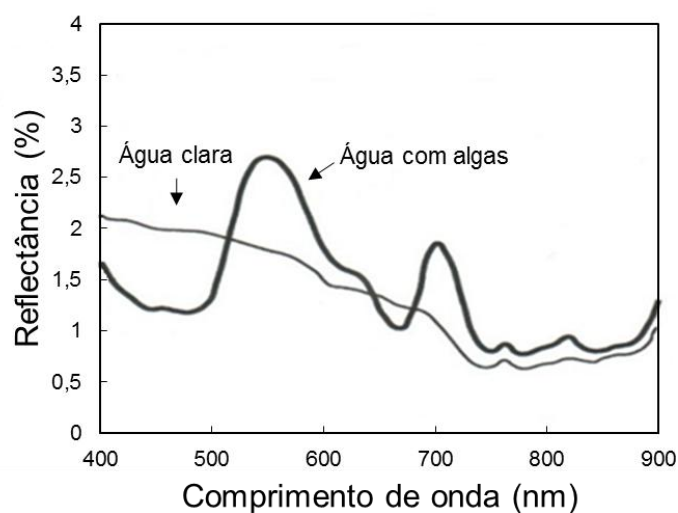


Figura 1. 3: Reflectância espectral da água clara e de água com algas (Adaptado de Jensen, 2009).

As partículas em suspensão provocam um aumento da refletância da água com o aumento da concentração devido ao aumento do coeficiente de espalhamento (Kirk, 2011). A fração inorgânica é a principal responsável por esse aumento, sendo que a refletância máxima ocorre na faixa do infravermelho próximo (800 nm) e entre 500 e 700 nm (Jensen, 2009). A Figura 1.4 mostra a refletância espectral da água com concentrações variáveis de SS para dois tipos de solo, argiloso (a) e siltoso (b). A refletância máxima do solo siltoso é maior que a refletância máxima do solo argiloso e o comportamento espectral na faixa de 500 e 700 nm é diferente para os dois tipos.

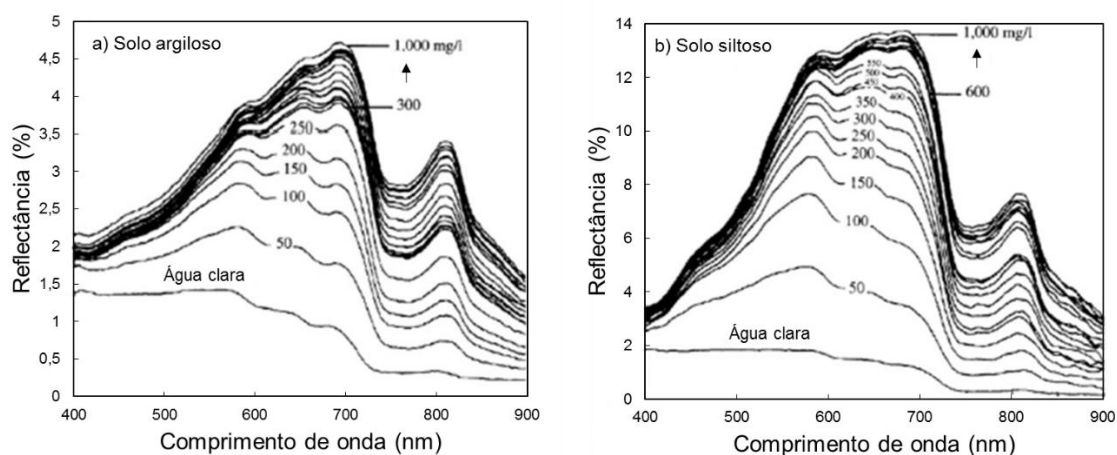


Figura 1. 4: Refletância espectral da água com concentrações variáveis de 0 a 1000 mg/l de (a) argila e (b) silte (Adaptado de Jensen, 2009).

1.4.3. Limitações dos sensores orbitais

Apesar dos avanços, o estudo de águas interiores por sensores orbitais ainda possui limitações tecnológicas, relacionadas às resoluções dos sensores, e metodológicas, como a discriminação espectral dos COAs. Corpos d'água possuem uma dinâmica muito rápida e muitas vezes a resolução temporal do satélite não é suficiente para acompanhar essas alterações. Se por um lado um satélite possui alta resolução temporal, por outro, sua resolução espacial pode ser limitada. É o caso do sensor MODIS, a bordo do satélite Terra e Aqua, que permite dados diários, mas sua resolução espacial de 250 m (para as faixas do vermelho e do infravermelho próximo) e 500 m (azul e verde) limita sua utilização à escalas locais. Já os satélites da série Landsat possuem resolução espacial de 30 m e temporal de 16 dias, tornando possível o estudo de corpos d'água menores, mas com limitação para aplicações de monitoramento contínuo.

Também são importantes a resolução radiométrica (capacidade em diferenciar níveis de cinza), a faixa e a largura espectral dos sensores orbitais. Diferente de outros alvos, como o solo e a vegetação, a contribuição da radiância da água na região do visível é pequena (reflectância em torno de 4% - Novo, 2001), e a partir de 740 nm (faixa do infravermelho próximo) quase todo fluxo incidente é absorvido pela água pura (Jensen, 2009). Faixas espectrais mais curtas podem facilitar a diferenciação dos COAs da água, como pigmentos fotossintetizantes presentes em organismos aquáticos (Bajjouk *et al.*, 1998). Dados de sensores hiperespectrais, que atendem a esse requisito, não são abundantes e facilmente acessados como os sensores multiespectrais. A aquisição de dados, tanto *in situ*, quanto de imagens livres de cobertura de nuvens, também é outra questão importante e que pode limitar as aplicações. Dados *in situ* muitas vezes são necessários para validação de estimativas de COAs e devem ser adquiridos em um curto intervalo de tempo à passagem do satélite.

CAPÍTULO 2: Utilização de dados MODIS para caracterização do padrão anual de sólidos em suspensão na Lagoa dos Patos

Resumo: O entendimento do transporte de sólidos em suspensão (SS) em corpos d'água é de grande importância para compreensão dos processos ecológicos e para a gestão de atividades econômicas. A dificuldade do monitoramento sistemático, por meio dados *in situ*, torna a utilização do sensoriamento remoto uma alternativa para avaliar a distribuição de SS. O objetivo desse trabalho é caracterizar a distribuição espaço-temporal anual de SS na Lagoa dos Patos a partir de uma série temporal de 15 anos de imagens da reflectância na faixa do vermelho do sensor MODIS (produto MOD09Q1). O padrão anual foi avaliado a partir do espectro temporal de cinco pontos e de transectos longitudinais/transversais ao longo da laguna. Foi observado que a reflectância possui um padrão sazonal com aumento do outono até o final da primavera, e que no corpo lagunar e no estuário a reflectância varia ao longo do ano. Também foi possível observar um aumento da reflectância na área anterior aos cordões de areia e na margem oeste da laguna em janeiro, fevereiro e março. Interpretações da variação espaço-temporal da reflectância, relacionadas a descarga fluvial e a ação dos ventos, foram apresentadas. Diferentes tipos de SS alteram a intensidade da reflectância, cujo maiores valores não significam, necessariamente, maiores concentrações de SS.

Abstract: Understanding the transport of suspended solids (SS) in water bodies is of great importance for comprehension of ecological processes and the management of economic activities. The difficulty of systematic monitoring by *in situ* data makes use of the remote sensing an alternative to evaluate the distribution of SS. The aim of this work is to characterize the spatio-temporal distribution of SS in Lagoa dos Patos from a time series of 15 years of reflectance images in red band of the MODIS sensor (product MOD09Q1). The annual pattern was evaluated from the temporal spectrum of five points and longitudinal/transverse transects along the lagoon. It was observed that the reflectance has a seasonal pattern with increase in the autumn until the late spring, and that in the lagoon body and estuary the reflectance varies throughout the year. It was also possible observed an increase in reflectance in the area before the sand and on the west margin of the lagoon in january, february and march. Interpretations of the spatio-temporal variation of reflectance related to river discharge and the action of the winds were presented. Different types of SS change the reflectance intensity, whose the highest values don't mean, necessarily, higher concentrations of SS.

2.1. Introdução

A Lagoa dos Patos, localizada no sul do Brasil, é considerada a maior laguna costeira do mundo (Kjerfve, 1986), com grande importância para atividades portuárias, navegação e pesca. Variações na concentração de sólidos em suspensão (SS) na laguna impactam essas atividades e os processos ecológicos, como o fornecimento de nutrientes para as comunidades biológicas (Abreu *et al.*, 1995; Bergesch *et al.*, 1995; Abreu *et al.*, 2010), a iluminação na camada superficial da água (Calliari, 1998) e as taxas de sedimentação nos canais de navegação, que exigem a manutenção do calado com a dragagem (Toldo Jr. *et al.*, 2005).

Neste contexto, torna-se necessário compreender o destino e o transporte de SS na laguna pelo interesse ambiental e econômico. Esforços foram realizados para compreender a hidrodinâmica da laguna por meio de modelos numéricos, a exemplo de Möller *et al.* (1996), Möller *et al.* (2001) e Castelão e Möller (2003). Entretanto, há poucos estudos relativos às variações de SS (Pereira, 2003; Calliari *et al.*, 2009), sendo que a maioria dos trabalhos se restringem ao estuário (Hartmann e Schettini, 1991; Hartmann, 1996; Ávila, 2013).

A circulação superficial da laguna foi observada por meio de técnicas de sensoriamento remoto utilizando o material em suspensão como traçador (Herz, 1977; Hartmann *et al.*, 1982; Hartmann, 1988). A utilização de dados orbitais para estudos de SS é possível devido ao espalhamento da radiação eletromagnética provocado pelas partículas em suspensão na água. Quanto maior a concentração de SS, maior o espalhamento e, conseqüentemente, maior a reflectância (Kirk, 2011). A região do espectro eletromagnético correspondente ao comprimento de onda do vermelho é mais sensível aos SS, já que há um máximo de reflectância entre 500 e 700 nm (Novo, 2001). A faixa do infravermelho próximo também é utilizada em águas com elevada concentração de SS devido ao aumento da taxa de espalhamento e de retroespalhamento com o aumento da concentração, existindo espalhamento suficiente para suplantam a forte absorção pela água nessa faixa (Jensen, 2009).

Diversas são as aplicações dos dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites Terra (EOS AM-1) ou Aqua (EOS PM-1), para estudos de SS em corpos d'água. Villar *et al.* (2012) estimaram a concentração de SS no rio Ucayali (bacia do rio Amazonas) para preenchimento de dados faltantes de uma estação pertencente a rede de monitoramento. Mendes *et al.* (2014), utilizaram dados MODIS, séries temporais de velocidade e direção do vento, maré e descarga fluvial para caracterizar a variabilidade espaço-temporal da pluma do estuário Douro, Portugal. Shi e Wang (2009) quantificaram sólidos em suspensão no

Rio Mississippi no Golfo México, após chuvas intensas e inundações ao longo do rio. E Long e Pavelsky (2013) monitoraram o transporte de sedimentos em suspensão e recarga hidrológica no Delta Peace - Athabasca, Canadá. Nestes estudos, foram utilizados dados de concentração de SS para criar modelos empíricos, modelos empíricos encontrados na literatura, ou ainda, apenas a reflectância como pressuposto da relação da reflectância e concentração de SS.

O objetivo desse estudo é caracterizar o padrão espaço-temporal anual de sólidos em suspensão na Lagoa dos Patos a partir de uma série temporal de 2000 a 2015 da reflectância no vermelho do sensor MODIS (produto MOD09Q1). Além disso, avaliar a influência de fatores que forçam a circulação da laguna, como a ação dos ventos e a descarga fluvial, na distribuição de SS.

2.2. Área de estudo

A Lagoa dos Patos (Figura 2.1) possui uma área de 10.227 km², profundidade média de 5 m e eixo principal de 180 km, que se estende na direção NE-SO (Asmus, 1998). O Oceano Atlântico está conectado com o sul da laguna por um único canal formando uma área estuarina que representa 10% da área total da laguna (Möller e Fernandes, 2010). O limite médio da entrada de água do mar é a região da Ponta da Feitoria, podendo se estender até a parte norte da laguna ou ficar restrita a desembocadura na Barra do Rio Grande (Asmus, 1998).

Sedimentos arenosos predominam das margens da laguna até a isóbata de 5 m e sedimentos lodosos dominam nas partes mais profundas (Toldo Jr., 1991). Cordões arenosos transversais ao eixo da laguna estão presentes acima do nível da água (em média 1 m), dando ao corpo principal uma configuração de múltiplas células. Herz (1977) definiu quatro células no corpo principal, sendo apresentadas na Figura 2.1 como C1, C2, C3 e C4.

As águas da Lagoa dos Patos são provenientes das bacias do Guaíba, Camaquã e do Canal São Gonçalo (conectado com a Lagoa Mirim), que deságuam pela região norte, central e sul da laguna, respectivamente, correspondendo a uma bacia de drenagem de aproximadamente 201.626 km² (Asmus, 1998).

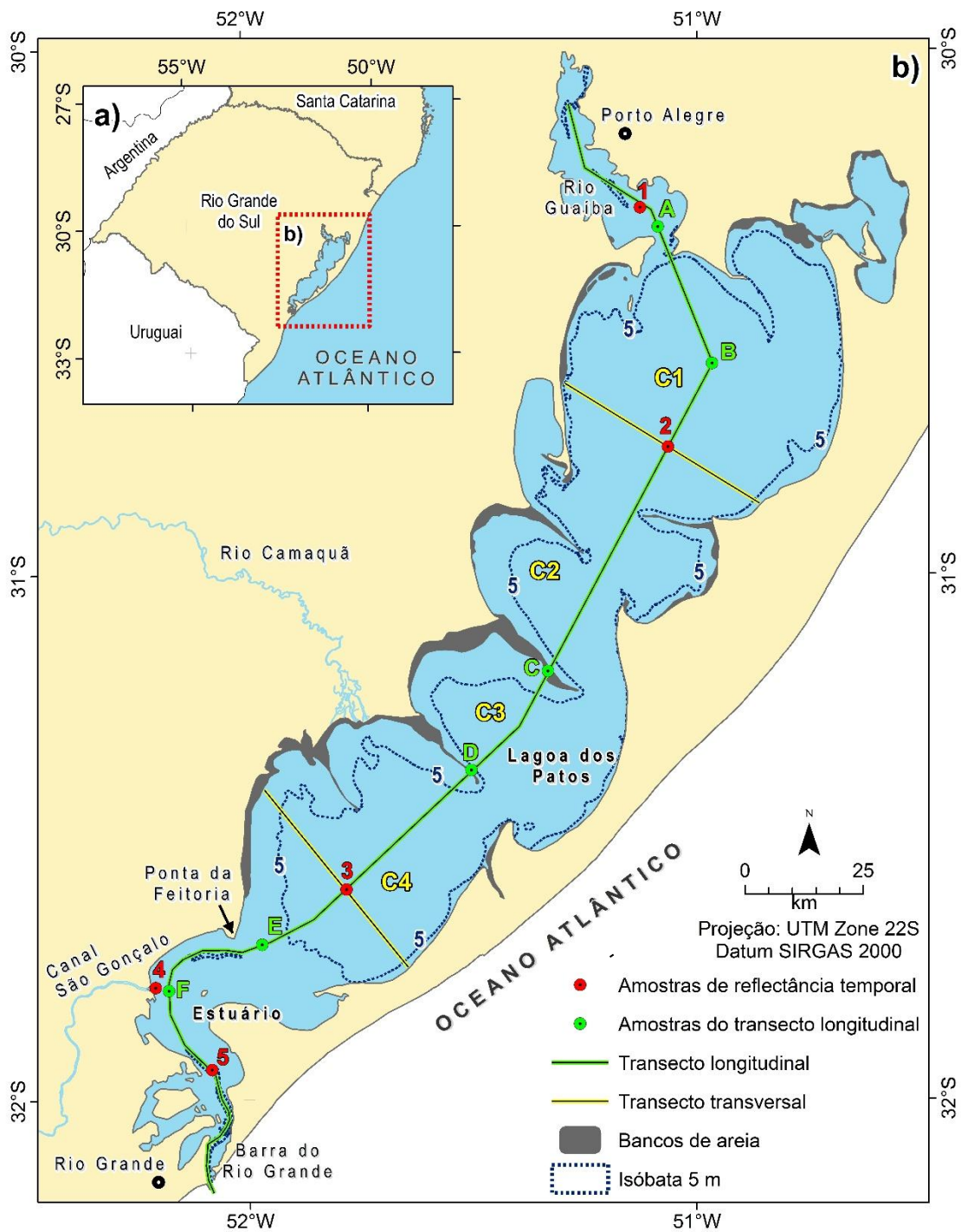


Figura 2. 1: a) Rio Grande do Sul, Brasil; b) Lagoa dos Patos.

A contribuição média anual de água doce na laguna é de $2400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Möller *et al.*, 1996) sendo que os rios Jacuí e Taquari, principais tributários do Rio Guaíba, contribuem com cerca de 85% da descarga (Herz, 1997; Niencheski e Windom, 1994). A descarga média anual do rio Camaquã é de $307 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e do Canal São Gonçalo é de $700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Vaz *et al.*, 2011). A descarga fluvial apresenta um padrão sazonal com maiores descargas no inverno/primavera e menores no verão/outono (Figura 2.2a).

A região da Lagoa dos Patos está sob o controle do centro de alta pressão do anticiclone do Atlântico Sul resultando na dominância de ventos de nordeste (NE) de setembro a abril, e ventos de sudoeste (SO), associados a passagem de frentes frias, mais comuns de maio a outubro (Klein, 1998; Garcia, 1998). A Figura 2.2b apresenta desvios da média anual da série de ventos no município de Chuí de 1965 a 1999.

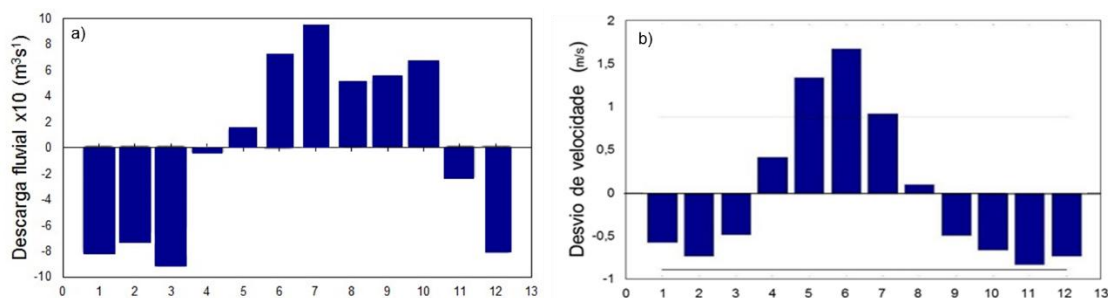


Figura 2. 2: a) Desvios mensais para a série de descarga fluvial dos rios Jacuí e Taquari (01/1940 a 12/2002); b) Desvios mensais da série de velocidade dos ventos no Chuí (01/1964 a 12/1999). Os valores positivos representam os ventos provenientes de quadrante sul e valores negativos do quadrante norte.

Em escalas de tempo associadas a passagem de sistemas frontais (6-15 dias) a ação do vento remoto (maré meteorológica) e do vento local (tensão do vento sobre a superfície da água) são os principais fatores que impulsionam, respectivamente, a circulação no estuário e no corpo lagunar (Möller *et al.*, 2001). Já a amplitude da maré astronômica (0,45 m) tem pouca influência na circulação (Herz, 1977).

Como consequência da ação do vento, ocorre o empilhamento da água no norte do corpo lagunar e na região da Ponta da Feitoria durante, respectivamente, ventos de SO e NE (Figura 2.3). O efeito remoto do vento de SO favorece a entrada de água no estuário e durante ventos de NE o nível da água próximo à costa é reduzido (Möller *et al.*, 2001, Fernandes *et al.*, 2004).

Castelão e Möller (2003) observaram que em cada célula do corpo da laguna (C1, C2, C3 e C4) ocorre a formação de uma célula vertical de circulação. Quando ventos de NE atuam, parte da água acumulada na Ponta da Feitoria vai para o estuário e parte sofre subsidência retornando para o corpo lagunar pela camada de fundo. Ao norte, as águas afloram na superfície e são transportadas para o sul. O oposto ocorre com ventos de SO, a água sofre subsidência no norte e ressurgência na Ponta da Feitoria.

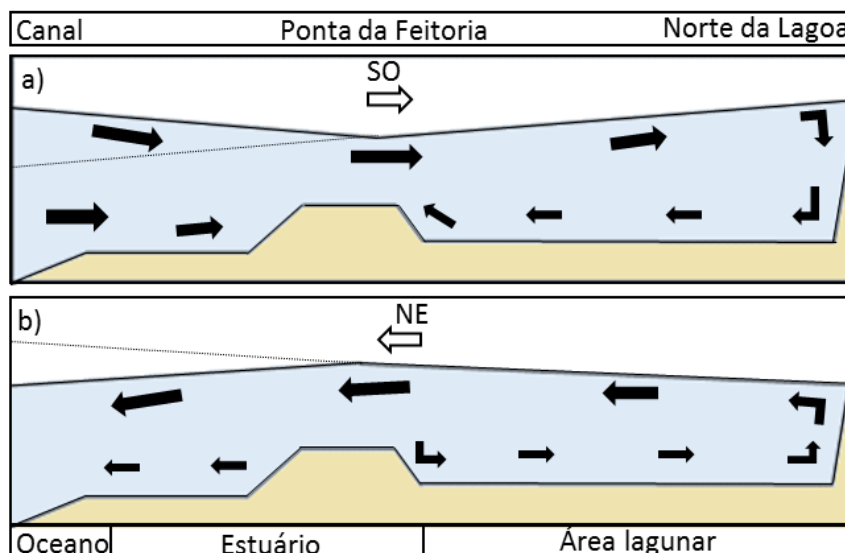


Figura 2. 3: Representação do comportamento dinâmico da Lagoa dos Patos quando atuam ventos: a) sudoeste e b) nordeste. A linha fina representa o nível caso a Lagoa fosse fechada em ambas as extremidades (Adaptado de Möller *et al.* 2001).

As correntes geradas pelo cisalhamento do vento na superfície da água interferem diretamente na turbulência da água. A energia cinética gerada pelo atrito entre o vento e o corpo d'água é transferida verticalmente na coluna podendo provocar a resuspensão de sedimentos e desestratificação térmica (Jin e Wang, 1998). A profundidade máxima afetada pela onda ao se propagar equivale à metade do comprimento de onda. Este e a altura da onda dependem da velocidade e duração do vento, e do *fetch* (dimensão da área em que o vento está atuando), de tal forma que quanto maior o *fetch*, maior a altura e o comprimento de onda. Em particular, na Lagoa dos Patos, o eixo na direção NE-SO do corpo lagunar, paralelo as direções predominantes do vento (NE e SO), resulta em um grande *fetch*. Além disso, como mostrado por Arantes *et al.* (2015), por ser uma laguna rasa, é provável que as perturbações geradas pela propagação das ondas atinjam o fundo, devendo ser comum a ressuspensão de sedimentos.

O material em suspensão na Lagoa dos Patos é composto principalmente de silte (80%) e argila (15%), que, respectivamente, diminui e aumenta do corpo lagunar até o estuário (Baisch e Wasserman, 1998; Hartmann, 1996). O rio Camaquã e o Canal São Gonçalo adicionam, respectivamente, sedimentos finos compostos por silte e argila na célula sul da laguna (C4) e no estuário. O mesmo ocorre para os rios Jacuí e Taquari no Rio Guaíba. Entretanto os sedimentos da foz do sistema Guaíba possuem um elevado teor de silte, o que de acordo com Baisch e Wasserman (1998) é uma primeira etapa de processo sedimentar a nível local na Lagoa dos Patos.

2.3. Materiais e Métodos

2.3.1. Pré-processamento dos dados MODIS

O produto MOD09Q1 do sensor MODIS/Terra, compondo um conjunto de 690 imagens em uma série temporal de 15 anos (novembro de 2000 a outubro de 2015), foi utilizado para a avaliação espaço-temporal de SS na lagoa. O produto MOD09Q1 é uma média de 8 dias dos pixels válidos da reflectância diária superficial na faixa do vermelho (620 a 670 nm). A imagem possui resolução espacial de 250 m, resolução radiométrica de 16 bits e é disponibilizada com correção geométrica e atmosférica satisfatórias (Vermote *et al.*, 2011).

As imagens possuem distorções geométricas e ruídos devido a visada do sensor, presença de sombra e cobertura de nuvens. A banda QA (*Quality Assurance*), disponibilizada junto com o produto, informa a qualidade de cada pixel. Contatou-se que, para a região do estudo, raramente a banda QA foi coerente. Regiões dentro da lagunaa apresentaram pixels com ruídos que não são indicadas na banda QA. Assim, optou-se por não utilizar a banda QA como critério de seleção dos pixels sem ruído. Outros trabalhos utilizaram esse critério de seleção dos pixels válidos (Villar *et al.*, 2012; Rêgo *et al.*, 2015).

Para remover os ruídos e as flutuações nos dados, as imagens foram filtradas utilizando o *software* Timesat (Jönssone e Eklundh, 2002; Jönssone e Eklundh, 2004). O filtro Logístico duplo, utilizado nesse trabalho, é baseado em uma função harmônica polinomial (Jönssone e Eklundh, 2004) e elimina as variações no espectro temporal. O filtro Savitzky-Golay, que preserva as pequenas variações do espectro, portanto, mais conservador, também foi testado para verificar se o filtro Logístico duplo eliminou informação relevantes. As filtragens apresentaram resultados próximos para o padrão anual da reflectância, optando-se pela curva mais suavizada (filtro Logístico duplo).

2.3.2. Padrão temporal

O padrão anual da reflectância no vermelho foi calculado a partir da média de cada composição de oito dias do produto MOD09Q1 para toda a série temporal, perfazendo 46 imagens médias. A taxa de variação da reflectância com o tempo dessas imagens também foi calculado. O espectro anual das 46 imagens da reflectância média e da taxa de variação foi avaliado em cinco pontos, apresentadas na Figura 2.1: 1) Rio Guaíba; 2) Norte da Lagoa dos Patos; 3) Sul da Lagoa dos Patos; 4) Canal São Gonçalo;

e 5) Estuário. O valor da reflectância representa uma média de 16 pixels no ponto (janela de 4 x 4 pixels).

2.3.3. Padrão espacial

Transectos transversais e longitudinal ao longo do corpo lagunar foram definidos nas imagens médias mensais do produto MOD09Q1 para analisar a variação espacial da reflectância ao longo do ano. Na Figura 2.1 são apresentados os transectos com pontos marcados para identificação.

2.4. Resultados e discussão

2.4.1. Pré-processamento

O espectro temporal do produto MOD09Q1 para um pixel localizado na Lagoa é apresentado na Figura 2.4. A curva em preto representa a série de imagens brutas, com picos associados a ruídos, e a curva em vermelho a série filtrada pelo filtro Logístico duplo, que eliminou ruídos e variações no espectro temporal. Regiões sem informação e com ruídos foram recuperadas a partir da informação da imagem anterior e posterior do espectro temporal. A filtragem também reduziu pequenas variações, como regiões de encontro de massas de água com grande diferença espectral, o que não prejudicou o objetivo desse trabalho.

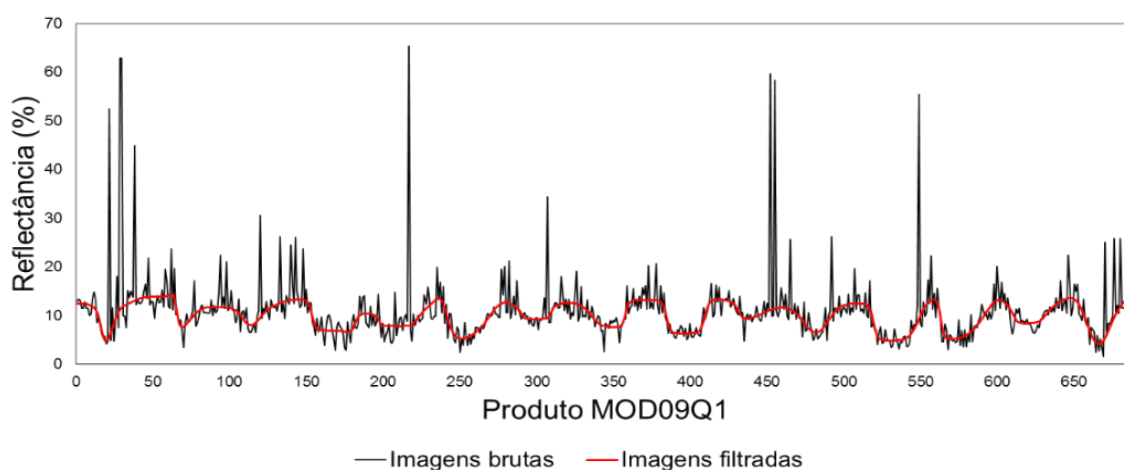


Figura 2. 4: Espectro temporal do produto MOD09Q1 entre outubro de 2000 e novembro de 2015. Imagens brutas (curva em preto) e filtradas (curva em vermelho).

2.4.2. Padrão temporal

O padrão anual do produto MOD09Q1 e a taxa de variação da reflectância com o tempo para o Guaíba, Norte e Sul da Lagoa dos Patos, Canal São Gonçalo e estuário são apresentados na Figura 2.5. As imagens de reflectância média mensal são apresentadas na Figura 2.6.

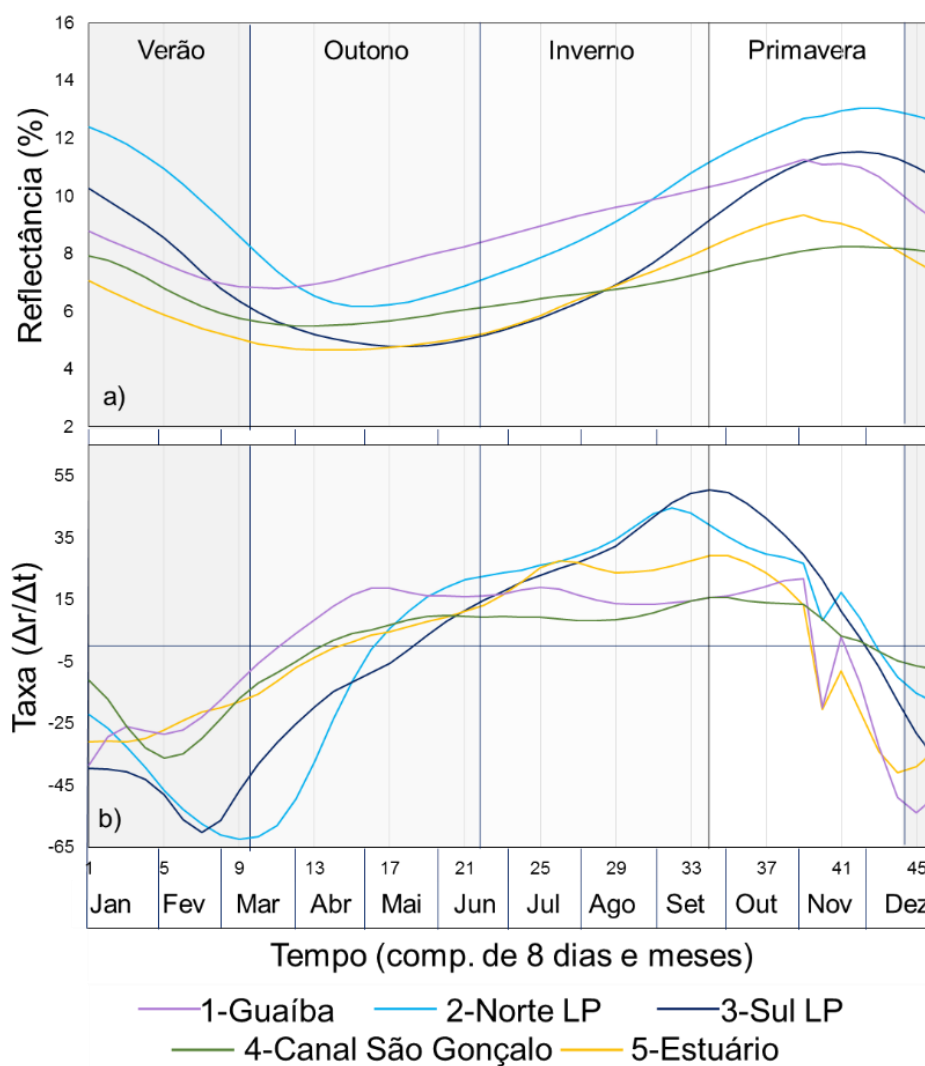


Figura 2. 5: a) Reflectância média ao longo do ano; b) Taxa de variação da reflectância com o tempo. Série de out/2010 a nov/2015) nos pontos: 1) Rio Guaíba, 2) norte e 3) sul da Lagoa dos Patos, 4) Canal São Gonçalo e 5) estuário.

A reflectância aumenta do outono até o final da primavera, e diminui do final da primavera até o outono. No Rio Guaíba, o valor mínimo ocorre em março, no Canal São Gonçalo e no Estuário em abril, no norte e no sul do corpo lagunar em maio. Em todas

as regiões o máximo ocorre em novembro ou no início de dezembro (norte). Na porção norte da laguna a taxa de redução e aumento da reflectância é máxima, respectivamente, em março e setembro sendo que a redução ocorre mais rapidamente que o aumento de SS.

Poucos estudos foram feitos relativos a compreensão da variação espaço-temporal de SS na laguna, o que dificulta a validação do padrão sazonal de SS encontrado neste trabalho. O estuário, que pode variar seu comportamento hidrodinâmico em curtos intervalos, tem sido mais monitorado por meio de campanhas não sistemáticas. Ávila (2013) quantificou a concentração de material particulado em suspensão no estuário de fevereiro a outubro de 2012 (sete campanhas), ano que a descarga fluvial foi abaixo da média histórica, e observou maiores concentrações em fevereiro seguido de março. O autor não coletou dados nos meses de setembro, novembro, dezembro e janeiro, período que foram encontrados os maiores valores de reflectância. Hartmann e Schettini (1991) realizaram 19 campanhas no estuário entre maio de 1982 e dezembro de 1983. Os autores encontraram maiores valores em novembro de 1982 e grandes variações, sem um padrão, em 1983. Estes exemplos evidenciam a dificuldade de utilizar dados *in situ* para o estabelecimento de um padrão temporal de SS na laguna.

Dados de concentração de SS do monitoramento realizado pelo porto de Rio Grande (<http://www.portoriogrande.com.br>) apresentaram alta correlação com a reflectância diária na faixa do vermelho do sensor MODIS (coeficiente de correlação de Pearson igual a 0,85 para $n = 54$), mostrando que a reflectância na faixa do vermelho indica a concentração de SS. Entretanto, a interpretação da intensidade da reflectância em diferentes regiões deve ser feita considerando as particularidades locais. A reflectância é afetada pela diferença no tipo de SS na laguna, devido às diferentes taxas de espalhamento da radiação. A reflectância máxima do Rio Guaíba e do Canal São Gonçalo são menores que no corpo lagunar (norte e sul), como mostrado na Figura 2.5, devido à diferença no tipo de SS e não, necessariamente, à menor concentração. Isto pode ser observado na Figura 2.6k, quando a descarga fluvial do Canal São Gonçalo é alta (Garcia, 1998) mas a reflectância é maior no corpo lagunar.

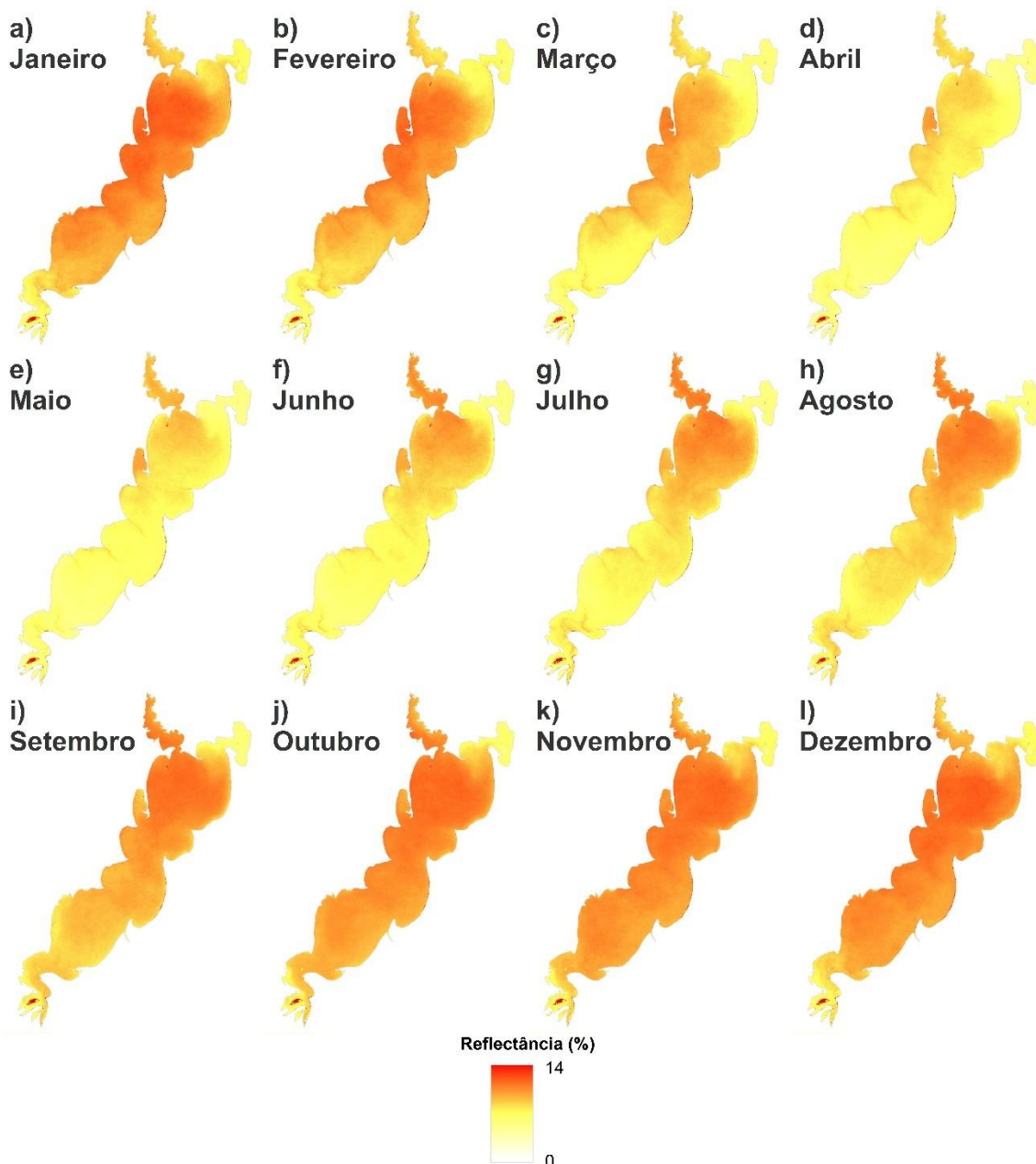


Figura 2. 6 Imagens de reflectância média mensal do produto MOD09Q1

A variabilidade de SS ao longo do ano na Lagoa dos Patos parece estar relacionada com a descarga fluvial (Figura 2.2a) e com a ação dos ventos (Figura 2.2b). Descargas acima da média, entre maio e outubro, contribuem para o aumento da concentração de SS. Entre novembro e abril a concentração diminui com menores descargas.

Como comentado, a ação dos ventos do quadrante sul e do quadrante norte promovem o empilhamento da água no corpo lagunar e a ressuspensão de SS deve ser comum na laguna devido à baixa profundidade média (5 m) e grande *fetch* (eixo NE-SO). É provável que a ação do empilhamento da água durante o vento de SO (abril a

agosto), aumente o tempo de residência da água, conseqüentemente dos SS proveniente da foz do sistema Guaíba. Já o vento de NE, predominante de setembro a março, empurra a água, com SS proveniente do Guaíba, para o sul da laguna. O incremento de SS no norte da laguna pelos tributários do Guaíba deve fazer com que o aumento de SS na coluna d'água seja maior no período coincidente de vento de NE com alta descarga fluvial (agosto a outubro). Isto está de acordo com a maior taxa de reflectância entre agosto e outubro (Figura 2.5b). No verão, mesmo com descargas fluviais abaixo da média, o déficit sazonal de água contribui para redução da coluna d'água, o que faz com que a propagação das ondas atinja o fundo mais facilmente, ocasionando maior ressuspensão de sedimentos.

Ávila (2013) observou que, no estuário, quando a descarga fluvial está abaixo da média histórica, as altas concentrações de material em suspensão são devidas, principalmente, a ressuspensão. Quando a descarga fluvial está próxima à média histórica, Paim e Moller (1986) observaram que o material em suspensão é proveniente dos principais tributários da laguna. As maiores reflectâncias não ocorrem no período de descargas acima da média. Pressupõe-se que isto esteja relacionado com o que foi observado por Ávila (2013) e Paim e Moller (1986). A ressuspensão de sedimentos siltosos no corpo da laguna é provocada pela ação dos ventos em períodos de baixa descarga (verão), já no período com alta descarga fluvial, sedimentos finos (argilosos e siltosos) predominam na laguna (inverno). Assim, como a reflectância é influenciada pelo tipo de SS, as maiores reflectâncias no verão podem estar relacionadas não as maiores concentrações, mas ao tipo de SS em relação ao processo dominante.

Um exemplo da influência da ação do vento na reflectância é observado pela menor reflectância do Rio Guaíba em relação ao norte da laguna de setembro a março (Figura 2.5a). Como a bacia de drenagem do Rio Guaíba é a principal fonte de SS no norte da laguna, e ventos de NE predominam de setembro a março, é provável que esse aumento esteja relacionado a ressuspensão de sedimentos. Com a ressuspensão, a reflectância será maior nessa região do que no Rio Guaíba.

Em maio, junho e julho a reflectância do estuário possui intensidade bem parecida com o sul da Lagoa dos Patos (Figura 2.5a). Isso se deve aos ventos remotos do quadrante sul, comuns nesse período, que provocam a entrada de SS e/ou a ressuspensão no canal de acesso. Esse fenômeno será melhor abordado as secção 2.4.3.

2.4.3. Padrão espacial

Os espectros longitudinais das médias mensais da reflectância abrangendo desde o Rio Guaíba até o canal do estuário são apresentados na Figura 2.7. Os espectros foram divididos em três grupos, de janeiro a abril (2.7a), de maio a agosto (2.7b) e de setembro a dezembro (2.7c). Regiões de interesse foram marcadas (A a F), apresentadas também na Figura 2.1.

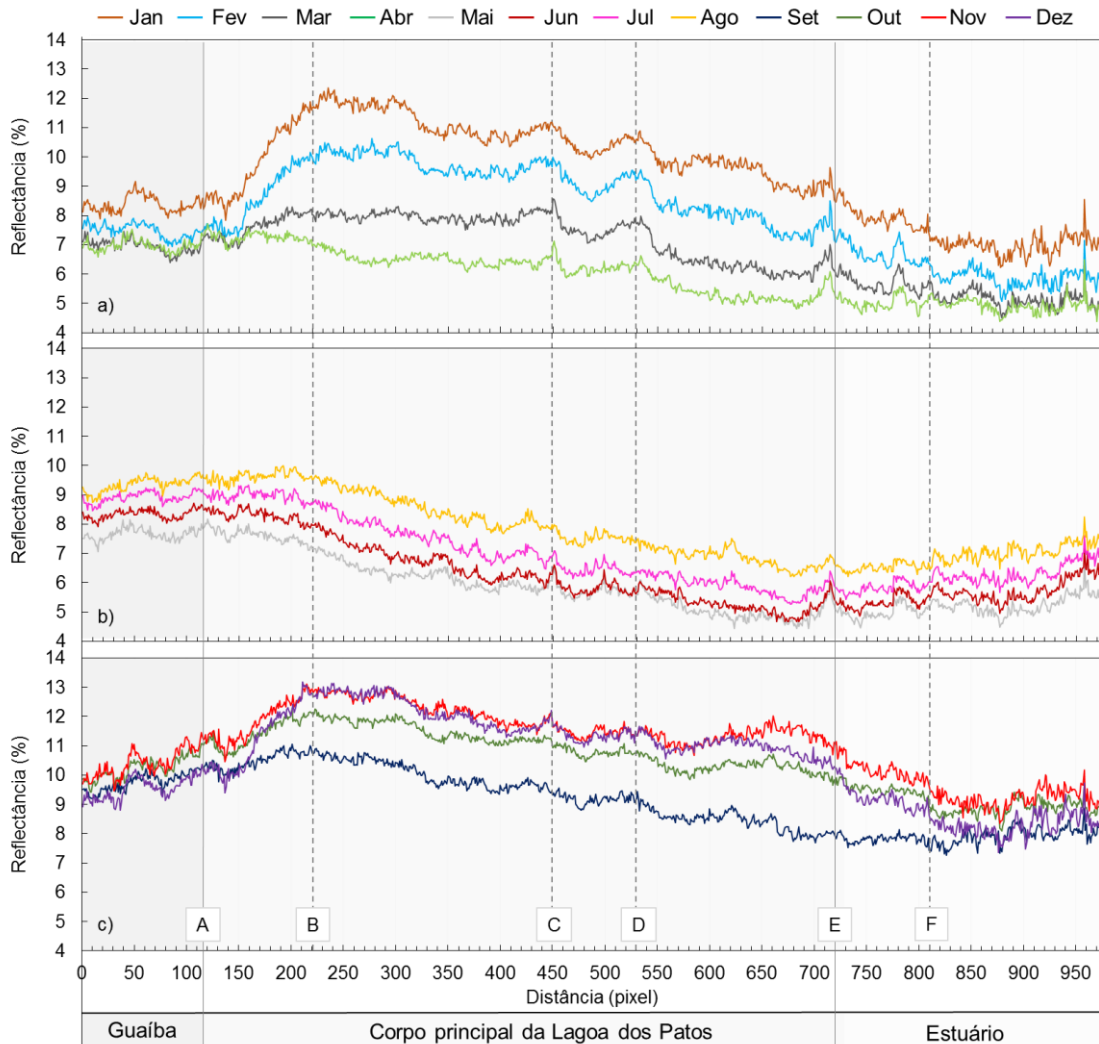


Figura 2. 7: Transectos longitudinais das médias mensais da reflectância normalizada, do Rio Guaíba até o estuário da Lagoa dos Patos entre: a) janeiro e abril; b) maio e agosto; e c) setembro a dezembro.

A zona de transição de A até B, mostra o aumento da reflectância no norte da Lagoa dos Patos em relação ao Rio Guaíba entre setembro e março, como já foi comentado. Ao longo do corpo lagunar, de B até E, a concentração de SS diminui possivelmente devido à sedimentação. Grande parte dos SS são depositados durante

o transporte, devido à baixa declividade e à reduzida velocidade de fluxo ao longo da Lagoa (Calliari, 1998).

Quando ventos de SO atuam, de maio a setembro, há um aumento da concentração ao longo do estuário. O aumento de SS em direção ao canal do estuário, principalmente em junho e julho, é devido ao efeito de ventos remotos de SO (maré meteorológica) que promovem a penetração da água do mar (fluxos de enchente). Como resultado, há introdução de SS provenientes da costa (Möller *et al.*, 2001) e/ou a ressuspensão de sedimentos depositados no sul do estuário (Niencheski e Windom, 1994; Hartmann, 1996). Rêgo *et al.* (2015), ao analisarem as águas do estuário do rio São Francisco, também observaram um aumento da reflectância no vermelho (MODIS) e atribuíram à ressuspensão de sedimentos.

Os cordões arenosos, que dividem o corpo principal da Lagoa em múltiplas células (C1, C2, C3 e C4), são facilmente identificados por picos de reflectância em abril e maio (Figura 2.6 d) e) e Figura 2.7 - C, D e E), quando a transparência da água é alta. Em janeiro, fevereiro e março observa-se um aumento da reflectância na área anterior aos cordões de areia (Figura 2.6 a) b) c) e Figura 2.7a) - C e D). Esse aumento pode estar relacionado com às barreiras que os cordões impõem no fluxo da água e/ou à circulação em formato de vórtices, devido a configuração em células da laguna, conforme constatado por Möller *et al.* (1996) quando ventos de NE atuam.

Como comentado, a reflectância diminui ao longo do corpo lagunar, de B até E, mas a taxa de redução não é constante ao longo do ano. Para verificar esse efeito, a diferença entre a reflectância de pontos localizados ao norte e ao sul da laguna (distância relativa do pixel 240 e 650 – Figura 2.6) foi feita para cada mês. As diferenças são apresentadas na Figura 2.8.

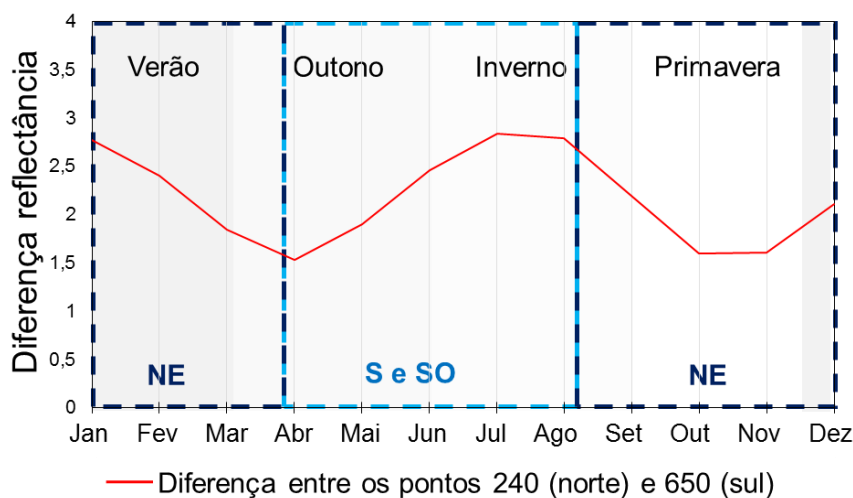


Figura 2. 8: Diferença entre a reflectância entre um ponto ao norte e outro ao sul da Lagoa dos Patos e direção predominante do vento ao longo do ano.

Os maiores valores nas diferenças da reflectância indicam maior concentração de SS no norte em relação ao sul do corpo lagunar. A diferença ao longo do ano pode estar relacionada com dois efeitos, o empilhamento da água e a ressuspensão de SS, ambos consequências da ação do vento. Quando ventos do quadrante sul predominam, entre abril e julho, a diferença aumenta. Nesse período, ocorre o empilhamento da água ao norte e a onda pode ter maior altura no norte em relação ao sul (maior *fetch*), promovendo a ressuspensão de SS principalmente no norte. Durante ventos de NE, a diferença diminui de agosto a novembro e de janeiro a abril. Esses ventos empurram a água para o sul e a maior altura de onda ocorre no sul. Em novembro e dezembro, esse padrão não ocorre e a diferença aumenta. Não foi possível encontrar explicação para a relação desses meses, mas é notável que a concentração de SS na laguna é maior nesse período (Figura 2.5).

Os espectros transversais das médias mensais da reflectância no norte (Transecto A) e no sul (Transecto B) do corpo lagunar são apresentados na Figura 2.9. Os espectros foram divididos em três grupos, de janeiro a abril (2.9a), de maio a agosto (2.9b) e de setembro a dezembro (2.9c).

A componente transversal da brisa do mar com preferência bem marcada de ventos de leste, comuns durante a primavera e o verão, também influencia na circulação na Lagoa dos Patos (Calliari *et al.*, 2009). A diferença na concentração de SS nos lados da laguna, de novembro a março, deve estar relacionada a circulação imposta por esses ventos de leste, que promovem ondas de maiores alturas à oeste, devido ao *fetch*, ocasionando ressuspensão de SS e provável erosão. De fato, segundo Calliari *et al.* (2009), a ocorrência de erosão costeira na margem oeste da laguna também é uma fonte de sedimentos. É notável que as maiores diferenças ocorram em janeiro, fevereiro e março, meses que também há maiores reflectâncias na área anterior aos cordões de areia no transecto longitudinal (Figura 2.7) e níveis mais baixos na laguna.

De abril a agosto, a reflectância transversal na Lagoa dos Patos deve estar relacionada aos ventos de quadrante sul, comuns nesse período.

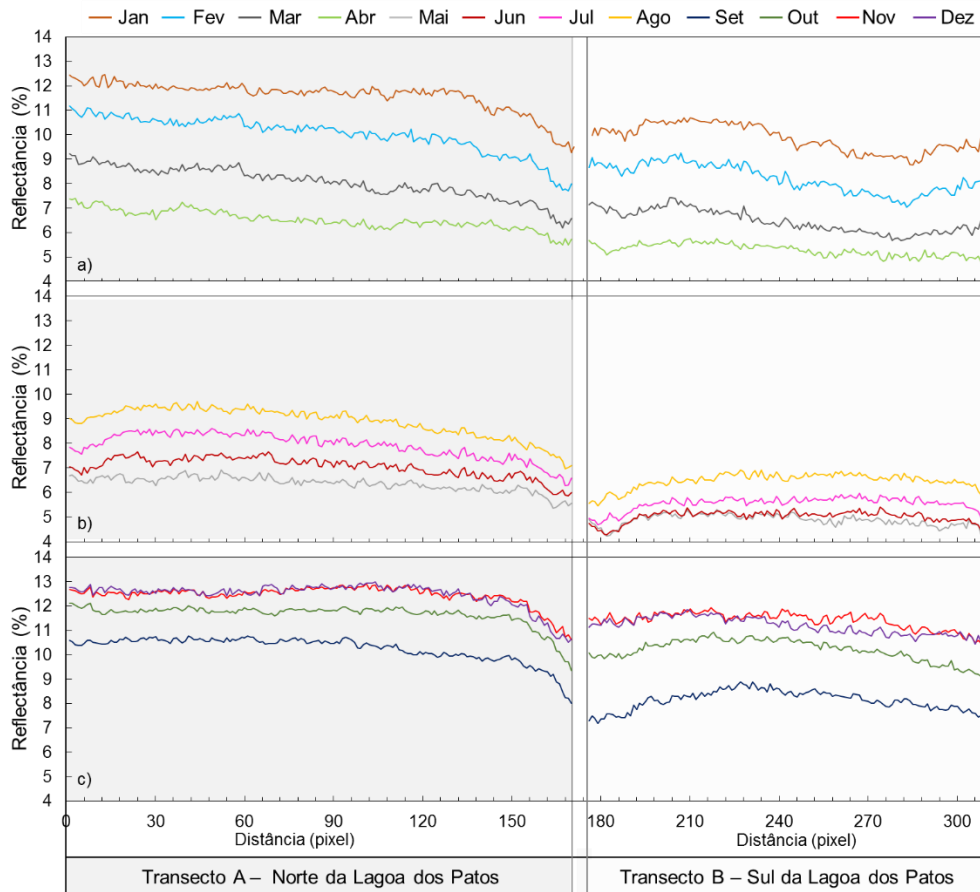


Figura 2. 9: Transectos verticais das médias mensais da reflectância no norte (A) e no sul (B) do corpo lagunar entre: a) janeiro e abril; b) maio e agosto; e c) setembro e dezembro.

2.5. Conclusões

A metodologia utilizada para avaliar o padrão espaço-temporal de SS a partir de dados MODIS é simples e possui potencial para estudo de grandes corpos d'água. Um programa de amostragem *in situ* não teria a capacidade de descrever a distribuição de SS nas águas por ausência de capacidade espacial e temporal. Ao mesmo tempo, amostragens são necessárias para calibração de modelos.

A reflectância na faixa do vermelho está relacionada com a concentração de SS mas o tipo de sólidos provenientes do Rio Guaíba e do canal São Gonçalo possuem comportamento espectral diferente dos sólidos do corpo da laguna. Dessa forma, os maiores valores de reflectância não significam, necessariamente, maiores concentrações.

A reflectância na faixa do vermelho aumenta de abril a novembro e diminui de dezembro a abril, sendo que a taxa de redução ocorre mais rapidamente que o aumento. Ao longo do corpo da laguna a reflectância diminui e ao longo do estuário aumenta de maio a setembro. Entretanto, observou-se que a redução no corpo da laguna não é

constante ao longo do ano. Também foi possível observar um aumento da reflectância na área anterior aos cordões de areia e na margem oeste da laguna em janeiro, fevereiro e março.

A partir do padrão espaço-temporal de SS e de coincidências de aspectos da ação dos ventos e da descarga fluvial foram feitas interpretações, não conclusivas, de como esses fatores governam as variações de SS na laguna. Tais como o incremento de SS pela descarga e ressuspensão de sedimentos provocada pela ação dos ventos. As relações causa-efeito devem ser confirmadas por trabalhos futuros, como por exemplo, a modelagem hidrodinâmica/sedimentos da laguna.

Referências

- Abreu P. C., Hartmann C., Odebrecht C. 1995. Nutrient rich salt-water and its influence on the phytoplankton of the Patos Lagoon estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 40: 219-229.
- Abreu, P. C., Odebrecht, C., Niencheski, L. F. 2010. Nutrientes dissolvidos. In: Seeliger, U. e Odebrecht, C., Ed(s). *O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações*. Rio Grande: FURG. p. 43-51.
- Arantes, E. P.; Marques, M; Andrade F. O., Okawa, C. M. P; e Souza, M. L. 2015. Conceito da profundidade de mistura gerada pela ação de ondas aplicado à Lagoa dos Patos, RS, Brasil. In: *Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 21. (SBRH)*, Brasília. Anais... São Paulo, 2015.
- Asmus, M. L. 1998. A planície costeira e a Lagoa dos Patos. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C. e Castello, J.P, Ed(s). *Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil*. Rio Grande: Editora Ecoscientia. p. 7-12.
- Ávila, R. A. 2013. Distribuição do material particulado em suspensão e suas inter-relações com diferentes propriedades no estuário da Lagoa dos Patos. 91p. *Dissertação- Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica*. Instituto de Oceanografia. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Baisch, P. R., Wasserman, J. C. 1998. Chemistry and distribution of trace elements in the Patos Lagoon, South Brazil. In *Environmental geochemistry in the tropics* (pp. 97-126). Springer Berlin Heidelberg.
- Bergesch, M., Odebrecht, C., e Abreu, P. C. 1995. Microalgae of the patos lagoon estuary: sediment-water column interaction. *Oecologia Australis*, 1(01), 273-289.
- Calliari, L. J. 1998. O ambiente e a Biota do Estuário da Lagoa dos Patos: Características geológicas. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C. e Castello, J.P, Ed(s). *Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil*. Rio Grande: Editora Ecoscientia. p. 13-17.

- Calliari, L. J., Winterwerp, J. C., Fernandes, E., Cuchiara, D., Vinzon, S. B., Sperle, M., Holland, K. T. 2009. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon–Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, 29(3), 515-529.
- Castelão, R. M., Möller Jr, O. L. 2003. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 25(2):91-106.
- Fernandes, E. H. L., Marino-Tapia, I., Dyer, K. R., Möller, O. O. 2004. The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary. *Ocean Dynamics*, 54(3-4), 348-359.
- Garcia, C. A. E. 1998. O ambiente e a Biota do Estuário da Lagoa dos Patos: Características hidrográficas. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C. e Castello, J.P, Ed(s). *Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil*. Rio Grande: Editora Ecoscientia. p. 18-20.
- Hartmann, C.; Calliari, L.J; Cardoso, J.N. 1982. Aplicação do sensoriamento remoto na interpretação dos processos estuários na Lagoa dos Patos – RS. In: Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 2. (SBSR), Brasília, Anais... São José dos Campos: INPE, 1982.
- Hartmann, C., e Schettini, C. 1991. Aspectos hidrológicos na desembocadura da Laguna dos Patos, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(4), 371–377.
- Hartmann, C. 1988. Utilização de dados digitais do TM para a obtenção dos padrões de distribuição do material em suspensão na desembocadura da Laguna dos Patos, RS. SJC/SP, Dissertação de Mestrado, INPE, 190p.
- Hartmann, C. 1996. Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da Laguna dos Patos, RS. Curso de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, UFRGS. Doutorado, 363.
- Herz, R. 1977. Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos. Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos. 722p. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Jensen, J. R. 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres; tradução: José Carlos Neves Epiphanyo et al.(coord.). São José dos Campos: Parêntese. 589 p.
- Jin, Kang-Ren; Wang, Keh-Han. 1998. Wind generated waves in lake Okeechobee. *Journal of the American Water Resources Association*. v. 34, p.1099-1108.
- Jönsson, P., Eklundh, L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(8), 1824-1832.
- Jönsson, P., Eklundh, L. 2004. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30(8), 833-845.
- Kjerfve, B. 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: *Estuarine variability*. New York: Academic Press. p. 63-81.
- Kirk, J. T. O. 2011. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3 ed. Cambridge: Cambridge University Press. 662 p.

- Klein, A. H. F.. 1998. Clima regional. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C. e Castello, J.P, Ed(s). Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil. Rio Grande: Editora Ecoscientia. p. 5-7.
- Long, C. M., Pavelsky, T. M. 2013. Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. *Remote Sensing of Environment*, 129, 197-209.
- Marques, W. C. 2005. Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos, Brasil. Master's Thesis, University of Rio Grande, Rio Grande do Sul.
- Mendes, R., Vaz, N., Fernández-Nóvoa, D., da Silva, J. C. B., Gómez-Gesteira, M., Dias, J. M. 2014. Observation of a turbid plume using MODIS imagery: The case of Douro estuary (Portugal). *Remote Sensing of Environment*, 154, 127-138.
- Möller O. O., Castaing P, Salomon JC, Lazure P. 2001. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*. 24:297-311.
- Möller, O. O., Fernandes, E. 2010. Hidrologia e hidrodinâmica. In: Seeliger, U. e Odebrecht, C., Ed(s). O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações. Rio Grande: FURG. p. 17-30.
- Moller, O. O., Stech, J., Math, M. M. 1996. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, 16(3), 335-351.
- Niencheski, L. F., Windom, H. L. 1994. Nutrient flux and budget in Patos Lagoon estuary. *Science of the total environment*, 149(1), 53-60.
- Paim, P. S. G., Möller, O. O. 1986. Material em suspensão e dissolvido no estuário da Lagoa dos Patos – FASE III. FURG/CIRM. Relatório técnico. 133pp.
- Pereira, R.S. Processos que regem a qualidade da água na Lagoa dos Patos, segundo o modelo DELFT3D. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Fundação Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande: 2003. 150p.
- Rêgo, I. S., Piscoya, R. C. C, Roig, H. L. 2015. Análise espaço-temporal de reflectância das imagens MODIS no estuário do rio São Francisco, AL/SE, nordeste do brasil. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 21. (SBRH), Brasília. Anais... São Paulo, 2015.
- Shi, W., Wang, M. 2009. Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008. *Geophysical Research Letters*, 36(7).
- Toldo Jr., E. E. 1991. Morfodinâmica da laguna dos patos, Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 18(1), 58-63.
- Vermote, E. F., Kotchenova, S. Y., e Ray, J. P. 2011. MODIS surface reflectance user's guide. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility, version, 1.
- Villar, R. E., Martinez, J. M., Guyot, J. L., Fraizy, P., Armijos, E., Crave, A., Lavado, W. 2012. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *Journal of hydrology*, 444, 221-228.

CAPÍTULO 3: Estimativa de parâmetros de qualidade da água no estuário da Lagoa dos Patos por meio de dados Landsat-8

Resumo: A determinação de parâmetros de qualidade da água em grandes corpos de água continentais é de grande importância para estudos ambientais. A partir das imagens multiespectrais de sensores orbitais é possível estimar alguns desses parâmetros. No entanto, a abordagem por estimativas diretas são pobres se comparadas as que levam em consideração a discriminação dos espectros e quantidade de componentes específicos. Este trabalho apresenta a abordagem do modelo linear de mistura espectral para estimar parâmetros de qualidade da água no estuário da Lagoa dos Patos, Brasil. O modelo de mistura foi aplicado à dados OLI/Landsat-8, gerando imagens frações de sólidos em suspensão, de areia de fundo e de matéria orgânica dissolvida. Regressão linear simples e múltipla foram utilizadas para produzir modelos empíricos considerando os parâmetros determinados *in situ*, as bandas espectrais e as imagens frações. Foram ajustados modelos empíricos adequados para estimativa da concentração de clorofila-a ($R^2 = 0,82$) e de sólidos em suspensão ($R^2 = 0,62$), da turbidez ($R^2 = 0,67$) e da profundidade do disco Secchi ($R^2 = 0,64$). Os resultados mostraram que o modelo de mistura apresenta grande potencial para estimar parâmetros de qualidade da água por imagens orbitais.

Abstract: The determination of water quality parameters in large continental water bodies is of great value to environmental studies. The synoptic view of multispectral remote sensing images has the potential to estimate some of these parameters. However, directly estimations generally results in poor results, preventing discrimination of the spectra and amount of specific components. This work proposes the approach of linear spectral mixing model to estimating water quality parameters in the Patos Lagoon estuary, Brazil. The mixing model was applied to OLI/Landsat-8 data and fraction images of suspended solids, sandy bottom and dissolved organic matter were produced. Simple and multiple linear regressions were used in order to produce empirical models confronting parameters measured in situ with spectral bands and resulting fraction images. The empirical models were set to estimate the concentration of chlorophyll-a ($R^2 = 0.82$) and suspended solids ($R^2 = 0.62$), the turbidity ($R^2 = 0.67$) and the Secchi disk depth ($R^2 = 0.64$). The results showed great potential for using spectral mixing models to indirectly estimate water quality parameters by orbital images.

3.1. Introdução

O sensoriamento remoto tem sido aplicado com êxito para estimar os componentes opticamente ativos da água (COAs) em grandes rios (Montanher *et al.*, 2014), lagos (Tyler *et al.*, 2006), reservatórios (Augusto-Silva, 2014) ou estuários (Gitelson *et al.*, 2007). Essas estimativas são possíveis devido às abordagens metodológicas que relacionam a reflectância registrada por sensores com os COAs, tais como matéria orgânica dissolvida, sólidos em suspensão e clorofila-a. Duas abordagens são comumente utilizadas: a analítica e a empírica. Segundo Morel e Gordon (1980), a abordagem analítica leva em consideração as propriedades ópticas inerentes dos COAs, como o coeficiente de absorção e espalhamento. A abordagem empírica busca relações estatísticas entre os valores de reflectância e dados *in situ*. Essas relações são expressas por funções que dependem das características dos componentes e da faixa espectral utilizada.

A concentração de sólidos em suspensão (SS) em águas costeiras e continentais tem sido estimada por modelos empíricos utilizando diferentes sensores orbitais, tais como, os sensores TM/Landsat (Montanher *et al.*, 2014), ETM/Landsat (Zhang, 2014) e MODIS/Terra (Shi e Wang, 2009; Petus, 2010). A região do espectro eletromagnético na faixa do vermelho e do infravermelho próximo (quando a concentração de SS é alta) são mais utilizadas nesses modelos por serem mais sensíveis aos SS (Kirk, 2011). A concentração de clorofila-a (Chl-a) também tem sido estimada em diferentes corpos d'água por algoritmos empíricos utilizando medidas radiométricas (Zimba e Gitelson, 2007; Yacobi *et al.*, 2011). Esses são elaborados de tal forma que haja maior sensibilidade à presença de Chl-a e menor para os outros componentes, como, por exemplo, a razão entre bandas da faixa de 700 nm (pico de reflectância) e 670 nm (região de absorção). O uso dessa razão tem a vantagem de reduzir os efeitos da reflexão especular na superfície da água e da variação atmosférica, além de eliminar os sutis efeitos da sombra presente nesses ambientes.

Diferentes autores citam fontes de incerteza que podem afetar a estimativa de COAs por dados de sensoriamento remoto (Mertes *et al.*, 1993; Novo, 2001; Pavelsky e Smith, 2009; Kirk, 2011; Montanher, 2014). Estas incertezas podem estar relacionadas a diferença, dentro da região de estudo, da cor, forma e composição dos sedimentos; a ocorrência de outros COAs; a saturação da reflectância em regiões com alta concentração de sedimentos; a diferença nas plumas de sedimentos em diferentes camadas da coluna d'água; a técnica utilizada na correção atmosférica; a reflexão especular; e a baixa resolução radiométrica dos sensores.

O modelo linear de mistura espectral (MLME) tem a capacidade de estimar a proporção de componentes, chamados *endmembers*, em cada pixel da imagem através de uma combinação linear (Shimabukuro e Smith, 1991). O modelo foi testado para determinação dos COAs no rio Amazonas utilizando medidas radiométricas em laboratório (Mertes *et al.*, 1993), em campo (Novo e Shimabukuro, 1994), e com sensores orbitais: de baixa resolução espacial (MODIS) (Novo *et al.*, 2006), alta resolução espacial (TM/Landsat-5) (Alcântara *et al.*, 2009) e hiperespectral (Hyperion-EO1) (Rudorff *et al.*, 2006).

A Lagoa dos Patos, localizada no sul do Brasil, é a maior laguna costeira do mundo. Possui uma área de 10.227 km², eixo principal de 180 km, que se estende na direção NE-SO (Figura 3.1), e profundidade média de 5 m (Asmus, 1998). O Oceano Atlântico está conectado com o sul da Lagoa por um único canal formando uma área estuarina correspondente a 10% da área total da Lagoa (Möller e Fernandes, 2010).

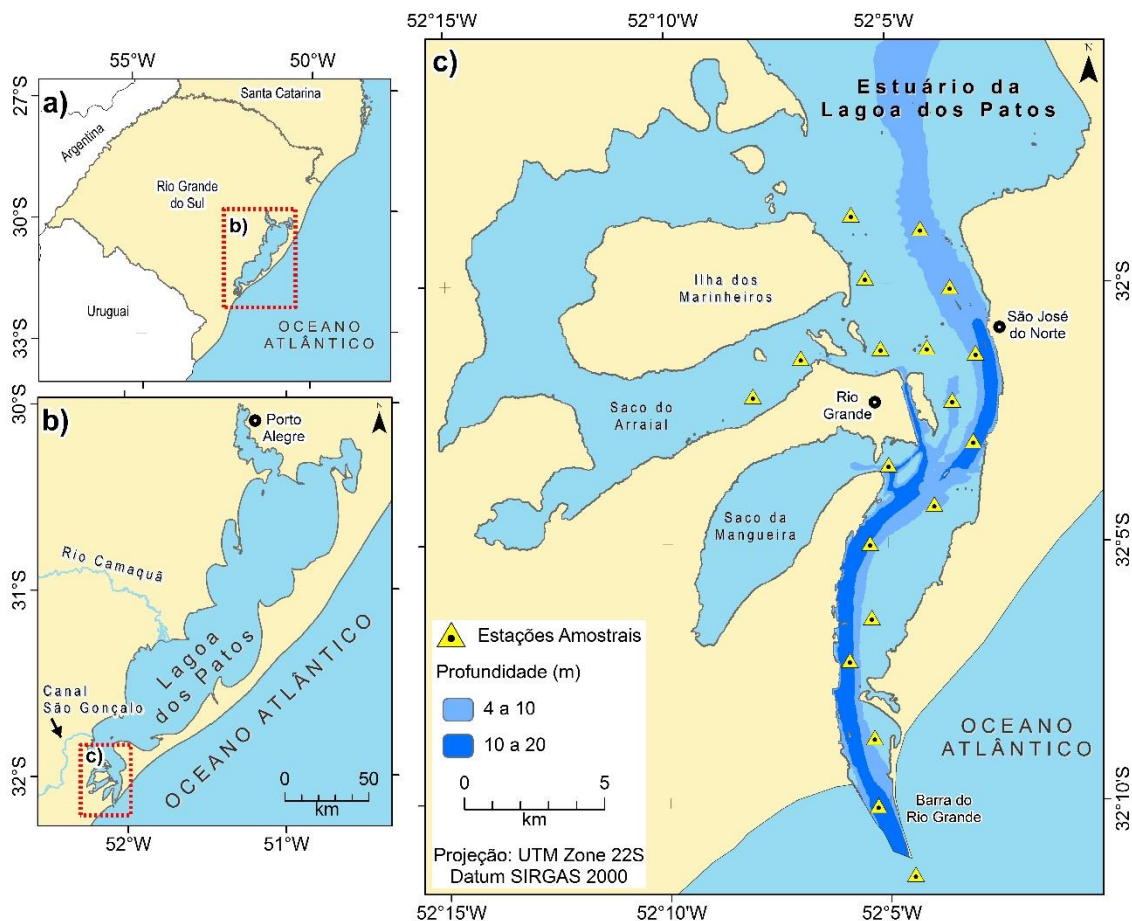


Figura 3. 1:a) Rio Grande do Sul, Brasil; b) Lagoa dos Patos; c) Estuário da Lagoa dos Patos.

A zona de maior profundidade do estuário corresponde ao Canal da Barra de Rio Grande, na qual é utilizada para navegação. Nas margens e nas partes rasas

predominam grandes bancos arenosos com profundidades entre 1 e 5 m (Calliari, 1998). Sedimentos argilo-silticos estão associados a canais profundos e enseadas rasas protegidas (profundidade inferior a 1 m) (Asmus, 1998; Calliari, 2010). O estuário recebe água do norte da laguna, da plataforma continental e do deságue do Canal São Gonçalo, tornando sua dinâmica muito complexa e com grande variação na composição da água.

O objetivo deste trabalho é utilizar a abordagem do MLME, aplicado à dados do Landsat-8, e modelos empíricos para estimar a concentração de clorofila-a, de sólidos em suspensão, a turbidez e a profundidade do disco Secchi no estuário da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil.

3.2. Modelo linear de mistura espectral

A reflectância de um pixel representa uma combinação das respostas espectrais dos componentes puros em cada banda, ponderada pela proporção com que ocorrem dentro do pixel (Somers *et al.*, 2011). Essa combinação pode ser linear (MLME) ou não linear (modelo não linear de mistura espectral). A combinação depende, basicamente, se o fóton incidente interage com apenas um componente (linear), ou se os componentes estão em íntima associação interagindo com mais de um componente (Somers *et al.*, 2011), como, por exemplo, múltiplos espalhamentos entre COAs.

A notação do MLME pode ser expressa por (Shimabukuro e Smith, 1991):

$$R_k = \sum_{j=1}^m r_{jk} f_j + e_k \quad (k = 1, \dots, p) \quad (1)$$

Onde: R_k é resposta do pixel na banda k ; r_{jk} é a assinatura espectral da componente j na banda k ; m é o número de *endmembers*; f_j é a fração estimada da componente j ; e_k é o resíduo estimado na banda k .

A solução da Equação 1 exige que o número de *endmembers* seja menor que o número de bandas espectrais para determinar as frações (f_j). Essas podem ser estimadas pelo método dos mínimos quadrados obedecendo duas restrições: cada fração deve resultar em valores entre 0 e 1; e o somatório das frações de cada pixel deve ser sempre 1, como descritas pelas Equações 2 e 3.

$$0 \leq f_j \leq 1 \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m f_j = 1 \quad (3)$$

Para resolver o modelo inversamente, é necessário a determinação apropriada do componente puro (*endmember*) e sua assinatura espectral. Segundo Schowengerdt (2006), as assinaturas espectrais dos *endmembers* podem ser derivadas de uma biblioteca espectral, de medidas com espectrorradiômetros (campo ou laboratório) ou da própria imagem, utilizando técnicas de projeções tais como *Vertex Component Analysis*, *Pixel Purity Index* e *N-Finder*. Essas técnicas automáticas de identificação dos *endmembers* fundamentam-se na geometria de distribuição dos pixels em gráficos de espalhamento, denominada *simplex* (Ma, 2014), cujos princípios foram utilizados no desenvolvimento do presente estudo.

Algumas dificuldades são comumente encontrados neste tipo de aplicação. Somers *et al.* (2011) citam a insuficiência da relação sinal-ruído ou presença de ruído nos pixels e a ocorrência da mistura não-linear como possíveis fontes de erros na estimativa das frações. Além disso, para algumas aplicações, a similaridade entre os espectros dos diferentes *endmembers* é uma dificuldade para obter resultados precisos.

3.3. Materiais e Métodos

3.3.1. Levantamento de dados de campo e análise em laboratório

Um levantamento de dados de campo foi realizado no dia 2 de junho de 2015. O intervalo entre a aquisição da imagem pelo satélite (às 12h30-GMT do dia 01/06/15) e o horário das coletas não ultrapassou 26 horas. Além disso, a velocidade média do vento se manteve baixa durante o período de coleta. Amostras de 1 litro de água superficial foram coletadas em 19 estações amostrais no estuário da Lagoa dos Patos, apresentadas por triângulos na Figura 3.1.

Os parâmetros analisados em laboratório foram: totais de sólidos em suspensão (TSS), clorofila-a (Chl-a), turbidez e salinidade. A análise de TSS seguiu a metodologia descrita em Emery *et al.* (1973) e as demais descritas em *Standard Methods for the Examination of Water And Wastewater* (APHA, 1998). Também foram realizadas medidas de transparência, pela profundidade do disco de Secchi (DS), velocidade e direção do vento com um anemômetro portátil, e as coordenadas das estações amostrais com um GPS Garmin eTrex 10.

3.3.2. Dados da imagem Landsat-8

Neste estudo, foram utilizados dados do sensor *Operational Land Imager* (OLI) e do *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), ambos a bordo do satélite Landsat-8, referentes

a órbita-ponto 221-082 e aquisição em 01 de junho de 2015. O produto da reflectância superficial desse dado, disponibilizada pelo *U. S. Geological Survey* (USGS), foi utilizada por apresentar correção atmosférica satisfatória. O algoritmo desenvolvido pelo USGS para remover o efeito da atmosfera é provisório e ainda não foi totalmente validado (USGS, 2015a), sendo utilizado a versão 1.5 de julho de 2015. O produto *Quality Assurance* (QA), que possui dados de qualidade da imagem e informações de máscaras (USGS, 2015b), também foi utilizado para criar uma máscara da Lagoa dos Patos.

Os dados do sensor OLI são compostos por nove bandas espectrais, tendo sido utilizadas as quatro bandas na faixa do espectro eletromagnético do visível: *Coastal aerosol* (430 a 450 nm), *Blue* (450 a 510 nm), *Green* (530 a 590 nm) e *Red* (640 a 670 nm); e a banda 10 da faixa do termal do sensor TIRS (10,60 a 11,19 μm). A resolução espacial das imagens é de 30 m (OLI) e 100 m (dados TIRS são disponibilizados em 30 m), e a resolução radiométrica de 12 bits (disponibilizada em 16 bits) (USGS, 2015b).

3.3.3. Aplicação do MLME

Como mencionado, a técnica utilizada para localizar os *endmembers* na imagem é chamada *simplex*. O arranjo espacial dos pixels de duas bandas em gráfico de espalhamento gera figuras geométricas, denominadas *simplex*, que descrevem os *endmembers* (componentes puros) e suas misturas (Carvalho Jr. *et al* 2003; Ma., 2014). Um exemplo é mostrado na Figura 3.2, onde os pixels das bandas x e y plotados em um gráfico de espalhamento formam um triângulo. Os pixels do interior do triângulo podem ser considerados como combinações dos seus vértices (combinações lineares se estamos assumindo modelo de mistura linear). Assim, o *simplex* exhibe nos vértices os *endmembers*, enquanto os demais pixels são provenientes de suas misturas.

Devido à mistura dos componentes da água no estuário, o conceito de “pixel puro” para aplicações do MLME nesse ambiente é uma idealização. Uma vez que é impossível encontrar diretamente um pixel puro na cena, considera-se a predominância de um componente em relação aos outros. Dessa forma, pode-se dizer que os *endmembers* identificados pelo *simplex* não são puros, mas representam o comportamento espectral dominante do componente e os pixels localizados no interior do *simplex* são combinações lineares desses. Abordagem similar foi utilizada em outros trabalhos (Mertes *et al.*, 1993; Novo *et al.*, 2006; Rudorff, 2006).

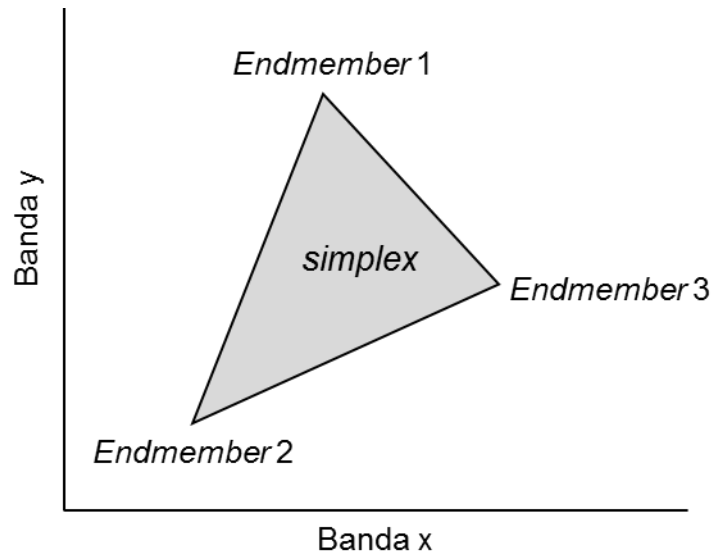


Figura 3. 2: Exemplo de simplex para o caso de 3 endmembers.

Os *endmembers* identificados no estuário pelo *simplex* da imagem foram examinados quanto ao espectro e à localização na imagem. As imagens frações geradas pelo MLME foram avaliadas a partir da análise visual, dos resíduos em cada banda e das correlações com parâmetros *in situ*.

3.3.4. Estimativa dos parâmetros

Os parâmetros analisados foram correlacionados, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (r), com as imagens frações e com as bandas do sensor OLI e TIRS. A partir das correlações significativas foram estabelecidos modelos empíricos utilizando regressão linear simples e de múltiplas variáveis. O coeficiente de determinação (R^2), o erro padrão de estimação (Erro) e o Teste-F de significância (p -valor), o qual avalia a relação entre as variáveis independentes, foram utilizados para avaliar o desempenho dos modelos.

3.4. Resultados e discussão

3.4.1. Correlação entre os parâmetros e dados do Landsat-8

A estatística descritiva dos parâmetros nas 19 estações amostrais é apresentada na Tabela 3.1. A medida de profundidade do DS só foi possível em 8 estações amostrais.

Tabela 3. 1: Estatística descritiva dos parâmetros analisados para as 19 estações amostrais no estuário da Lagoa dos Patos.

	Min - Max	Média - CV
Turbidez (NTU)	13,10 - 24,97	18,14 – 0,25
TSS (mg/l)	1,72 - 4,34	2,72 - 0,39
Salinidade	3,6 - 6,8	4,63 - 0,18
Chl-a (µg/l)	0,73 - 7,94	2,93 – 0,28
DS (cm)*	48 - 140	101 – 0,59

*número de amostras (n = 8);

No período deste estudo, baixos valores médios em superfície de TSS, salinidade e Chl-a foram observados. Rodrigues (2014) também encontrou baixos valores médios desses no Canal da Barra de Rio Grande em 23 e 24 de maio de 2012, período com baixa descarga fluvial.

Não foi observado relação entre a concentração de TSS e a salinidade como encontrado em trabalhos anteriores (Möller e Fernandes, 2010, Costa e Wallner, 2013, Rodrigues, 2014), possivelmente devido à baixa concentração de TSS. Como esperado, o TSS e a Turbidez apresentaram alta correlação de Pearson (0,95), assim como a profundidade do DS com a Turbidez e com o TSS (-0,82 e -0,83, respectivamente). Já a Chl-a e a salinidade apresentaram correlação de 0,86. Ao analisar dados horários de Chl-a no estuário, Andrade (2013) observou que pode ocorrer um padrão de aumento de Chl-a em função da elevação da salinidade.

A Tabela 3.2 apresenta as correlação significativas (p-valor < 0,001) entre os parâmetros e a reflectância das bandas espectrais nas estações amostrais. A correlação das bandas do visível (b1 a b4) com a Turbidez e o TSS eram esperadas. Entretanto, a correlação não foi maior na banda do vermelho (b4), como ocorre para grandes concentrações de TSS. A razão entre a banda 3 (verde) e a banda 2 (azul) apresentou correlação significativa com a Chl-a. A razão realça as diferenças entre as bandas, aumentando a sensibilidade à Chl-a e diminuindo a dos SS, já que há uma região de absorção pela Chl-a entre 400 a 500 nm e um máximo de reflectância em 550 nm (Jensen, 2009).

A correlação inversa da Chl-a com a banda 10 não é necessariamente uma relação do tipo causa-efeito. A banda 10 do sensor TIRS mede a temperatura de brilho no topo da atmosfera. Essa depende da emissividade, da temperatura de superfície e da transmitância atmosférica (Souza e Silva, 2005). Já a emissividade possui uma relação inversa com a salinidade (Souza *et al.*, 2009). Levanta-se a hipótese de que a

Chl-a está relacionada com outros fatores, como a salinidade ($r = 0,86$) e temperatura da água, e que esses, por sua vez, estão relacionados com a banda 10. Dados medidos simultaneamente em todas as estações são necessários para confirmar a hipótese.

Tabela 3. 2: Coeficiente de correlação de Pearson entre os parâmetros analisados e a reflectância das bandas espectrais

		Coeficiente de correlação de Pearson
Turbidez (NTU)	b1	0,756
	b2	0,788
	b3	0,778
	b4	0,716
TSS (mg/L)	b1	0,720
	b2	0,738
	b3	0,751
	b4	0,737
Salinidade	3/2	0,717
	b10	-0,770
Chl-a ($\mu\text{g/l}$)	3/2	0,855
	b10	-0,815

3.4.2. Imagens fração do MLME

3.4.2.1. Seleção dos *endmembers*

A partir da análise do *simplex* das bandas espectrais foi identificado quatro *endmembers*, os quais apresentam as propriedades ópticas características dos COAs descritas na literatura (Novo *et al.*, 2001, Jensen, 2009; Kirk, 2011): Água com sólidos em suspensão (SS); Água com matéria orgânica dissolvida (MOD); Água clara (AC) e Água com areia de fundo (ARE). Não foi possível identificar um *endmember* que pudesse ser assumido como água com Chl-a. A Figura 3.3 mostra os valores da reflectância dos *endmembers* identificados para as 5 bandas espectrais e a respectiva localização na imagem.

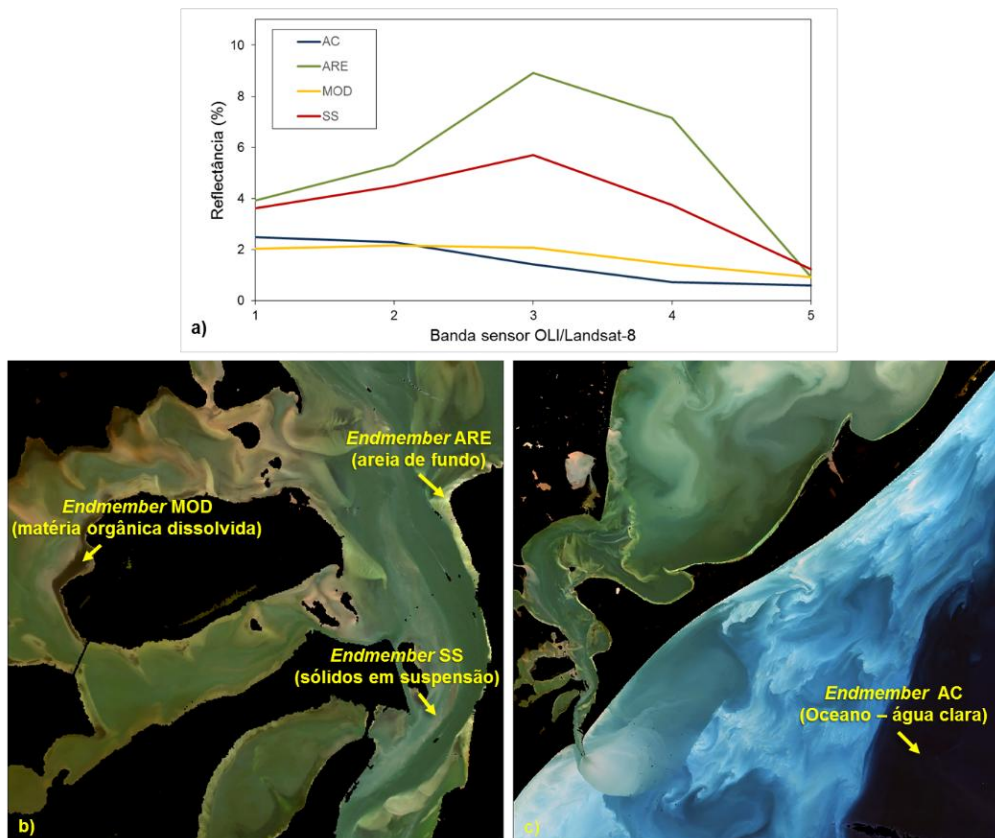


Figura 3. 3: a) Curvas espectrais dos endmembers identificados. Imagem em composição RGB cor verdadeira (432) do estuário da Lagoa dos Patos. Localização dos endmembers: b) Água com baixa concentração de sólidos em suspensão (SS); Água com matéria orgânica dissolvida (MOD) e Água com areia de fundo (ARE); c) Água clara (AC).

Os *endmembers* MOD e AC possuem comportamento espectral semelhante e a utilização dos dois no MLME pode gerar mapeamentos inconsistentes. Rudorff (2006) assumiu, dentre outros, os *endmembers* MOD e AC para mapeamento dos COAs em rios e planície de inundação do rio Amazonas. Segundo o autor, o mapeamento foi incoerente em regiões de planícies de inundação no período que ocorre mistura de água do fundo com a MOD, onde maiores frações de águas claras em relação as frações de MOD foram determinadas. Outros autores agruparam os dois *endmembers* em um único, chamando-o de água com pouco material em suspensão (Novo, 2006) ou consideram apenas um dos dois *endmembers* (Alcântara *et al.*, 2009; Novo e Shimabukuro, 1994). Nesse trabalho foi considerado apenas o *endmember* MOD por estar presente dentro do estuário e representar melhor as características dessas águas em relação ao *endmember* AC. Entretanto, a imagem fração resultante deve ser analisada com cuidado, uma vez que se assume apenas um *endmember* entre dois similares.

Como comentado, para resolver a Equação 1, o número de *endmembers* deve ser menor que o número de bandas. Assim, foram utilizados quatro bandas do visível (*Coastal aerosol*, *Blue*, *Green* and *Red*) e três *endmembers* (AC, ARE e SS). Foi verificado que a inclusão da banda do infravermelho próximo (banda 5) no MLME não agrega informação suficiente ao modelo. Nessa banda, a reflectância de todos os *endmembers* é próxima de 1%, não havendo distinção entre os espectros. Por outro lado, a adição da banda 1 (*Coastal aerosol*) no Landsat-8, em relação aos anteriores da série Landsat, proporcionou melhor desempenho do modelo para separar massas de água espectralmente distintas, já que essa banda é sensível aos COAs.

3.4.2.2. Mapeamento em termos de abundância fracional

As imagens em termos de abundância fracional dos *endmembers* são apresentadas na Figura 3.4. Níveis de cinza mais claros representam maiores abundâncias fracionais.

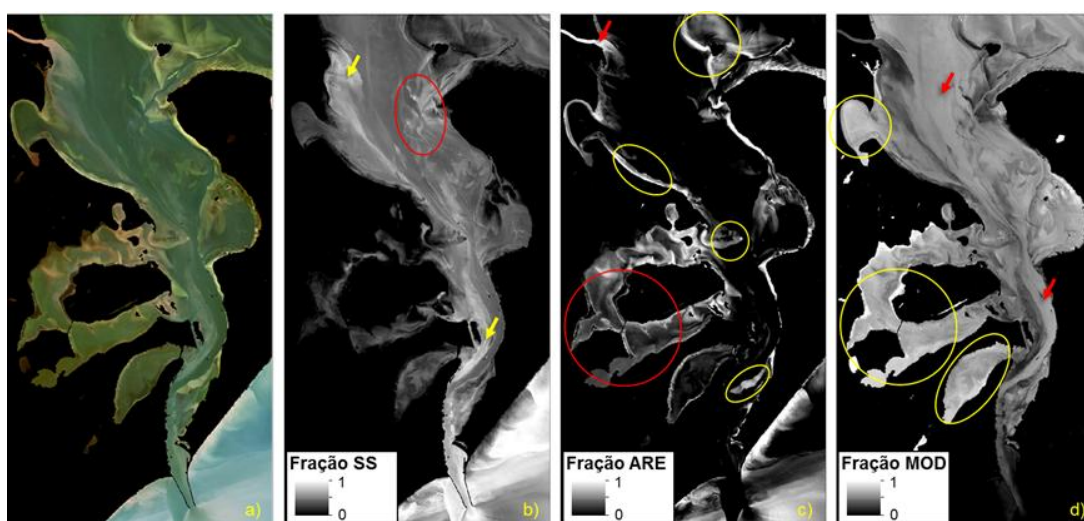


Figura 3. 4: a) Imagem em composição RGB cor verdadeira (432) do estuário da Lagoa dos Patos; Imagens em termos de abundância fracionais (0-1): b) frSS; c) frARE; e d) frMOD.

O modelo de mistura foi capaz de separar as regiões com bancos de areias, como exemplificado nas áreas destacadas com círculos amarelos na Figura 3.4c. Algumas dessas regiões foram mapeadas como sólidos em suspensão (círculo vermelho da Figura 3.4b). Setas amarelas na Figura 3.4b indicam as maiores frações de SS mapeadas (saída do Canal São Gonçalo e próximo à região portuária de Rio Grande).

A avaliação do mapeamento, em termos de abundância fracional de MOD, deve ser feito com cuidado. O mapeamento foi coerente em regiões de enseadas rasas que possuem maiores concentração de MOD (círculos amarelos na Figura 3.4d). Entretanto, a fração MOD foi superestimada em regiões de águas claras (setas vermelhas na Figura 3.4d) devido à ausência do *endmember* AC. A falta de dados de concentração de MOD dificulta a validação do mapeamento desse componente.

Na região próxima à ilha dos marinheiros, caracterizada por apresentar maiores concentrações de Chl-a, a fração ARE foi superestimada (círculo vermelho na Figura 3.4c). Isso se deve à falta de um *endmember* que represente a Chl-a. O mesmo ocorreu no Canal São Gonçalo (seta vermelha na Figura 3.4c), onde a fração ARE foi superestimada devido à falta de um *endmember* que represente o comportamento espectral das características dessa água.

Relacionando as imagens frações geradas com os parâmetros medidos experimentalmente nos pontos de coleta, observa-se correlação significativa ($\alpha = 0,05$) entre a imagem fração SS com a Turbidez ($r = 0,81$), com o TSS ($r = 0,78$) e com a profundidade do disco de Secchi ($r = -0,65$; $n = 8$).

3.4.2.3. Análise do resíduo do modelo de mistura

O valor residual é uma importante informação de saída do MLME, o qual pode recuperar espacialmente onde o modelo apresentou melhor estimativa (Zanotta *et al.* 2014). Os resíduos estimados em cada banda (Equação 1) são apresentados na Figura 3.5 em níveis de cinza, onde os pixels mais claros representam maiores resíduos.

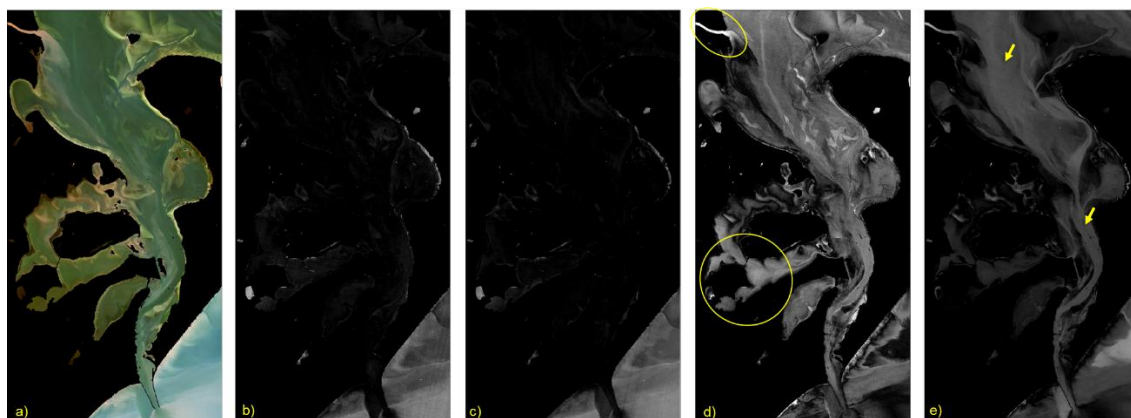


Figura 3. 5: a) Imagem em composição RGB cor verdadeira (432); resíduos estimados: b) banda 1; c) banda 2; d) banda 3; e) banda 4.

A análise do resíduo mostra que o mapeamento foi coerente para os *endmembers* considerados. Maiores resíduos, nas bandas 3 e 4, estão relacionados com a falta de *endmembers*, como a AC. Nota-se, pela análise da reflectância dos *endmembers* (Figura 3.3a), que a reflectância da AC é menor que a reflectância da MOD para as bandas 3 e 4, produzindo maiores resíduos nestas bandas. Assim, as regiões de maiores transparências, como nas setas amarelas da Figura 5e, possuem resíduos elevados devido à falta desse *endmember*. Essa relação pode ser confirmada pela correlação significativa ($\alpha = 0,05$) entre a profundidade do DS e o resíduo da banda 4 ($R^2 = 0,80$ para $n=8$). A inclusão do *endmember* AC no modelo não é possível devido a semelhança espectral com a MOD, mas a avaliação da informação residual pode ser útil para recuperação de informações, como a profundidade do DS.

Os maiores resíduos no Canal São Gonçalo (círculo amarelo superior na Figura 3.5d) e na região da ilha dos marinheiros (círculo amarelo inferior na Figura 3.5d) estão associados a falta de um *endmember* que represente as características da água do canal e da Chl-a, respectivamente.

3.4.3. Estimativa e mapeamento dos parâmetros

Análise de regressão linear foi utilizada para estabelecer modelos empíricos com uma ou mais variável independente. A Tabela 3.3 apresenta a estatística das regressões de estimativa.

Tabela 3. 3: Estatística dos modelos de estimativa de Chl-a e TSS ($n = 19$).

Estimativa	Variáveis independentes	R²	Erro	P-valor (Teste-F)
Chl	B10; B3/B2	0,55	1,27 ($\mu\text{g/l}$)	0,0024
Chl	B10; B3/B2; fr_{sand}	0,82	0,84 ($\mu\text{g/l}$)	0,00002
TSS	B1; B2; B3; B4	0,51	0,68 (mg/l)	0,041
TSS	fr_{ss}	0,62	0,54 (mg/l)	0,0001
Turbidez	B1; B2; B3; B4	0,59	2,97 (mg/l)	0,014
Turbidez	fr_{ss}	0,67	2,40 (mg/l)	0,00003

A regressão multivariada para estimar a Chl-a usando a imagem fração Areia como variável independente apresentou um R^2 melhor do que quando essa não foi considerada (0,82 comparado com 0,55). O melhor desempenho da regressão é devido a remoção da contribuição da radiação das áreas de bancos de areia, que superestimam a concentração de Chl-a. Assim, a regressão mais apropriada para a estimativa de Chl-

a ($\mu\text{g/l}$) considera a banda 10 (B10), a razão entre as bandas 3 e 2 (B3/B2) e a imagem fração Areia (frAREIA), como descrita na Equação 4 e na Figura 3.6a.

$$Chla (\mu\text{g/l}) = 355,79 - 0,132 \times B10 + 21,417 \times B3/B2 - 26,277 \times frAREIA \quad (4)$$

A imagem fração SS (frSS) como variável independente foi suficiente para predição do TSS (mg/l), como mostrado na Tabela 3.3. O baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,62$) pode estar associado a baixa concentração de sólidos (1,72 - 4,34 mg/l), e conseqüentemente, baixa taxa de espalhamento e de retroespalhamento da radiação. Mesmo assim, a alta resolução radiométrica do sensor OLI tornou possível, mesmo em baixa concentração e com certo grau de incerteza, a estimativa de TSS no estuário. A Equação 5 e a Figura 3.6b mostram a regressão ajustada.

$$TSS (mg/l) = 0,709 + 3,696 \times (frSS) \quad (5)$$

De forma semelhante à regressão ajustada para estimativa de TSS, foi ajustada uma regressão (Equação 6 e Figura 3.6c) para estimativa da Turbidez (NTU) ($R^2 = 0,67$).

$$Turbidez (NTU) = 8,414 + 18,177 \times (frSS) \quad (6)$$

As regressões utilizando as quatro bandas do visível como variáveis independentes para estimativa de TSS e Turbidez apresentaram um menor coeficiente de determinação ($R^2 = 0,51$ e $R^2 = 0,59$) e desempenho limitado comparado a estimativa pela imagem fração SS. Landim (2010) destaca que variáveis independentes que possuem alta correlação entre elas, como as quatro bandas (p-valor do Teste-F $> 0,01$), não são adequadas para regressões múltiplas por serem redundantes. Outra desvantagem da regressão múltipla com as quatro bandas é a superestimava desses parâmetros em áreas de bancos de areia, o que não ocorre quando utilizado a imagem fração SS.

A profundidade do DS é uma medida visual e indireta da zona eufótica da coluna d'água. A zona eufótica (Z) pode ser estimada por uma relação com a profundidade do DS ($Z = DS \times 1,44^{-1}$) (Kirk, 2011). Para se ter uma ideia da transparência no estuário, uma regressão (Equação 7 e Figura 3.6d), utilizando o resíduo da banda 4 (gerado pelo MLME), foi estabelecida para estimativa da profundidade do DS (cm). A regressão possui baixo poder de explicação ($R^2 = 0,64$; $n=8$; Erro 18,25 cm; p-valor do Teste-F = 0,017).

$$\text{Profundidade do DS (cm)} = 44,315 + 1,726 x (\text{resíduo da banda 4}) \quad (7)$$

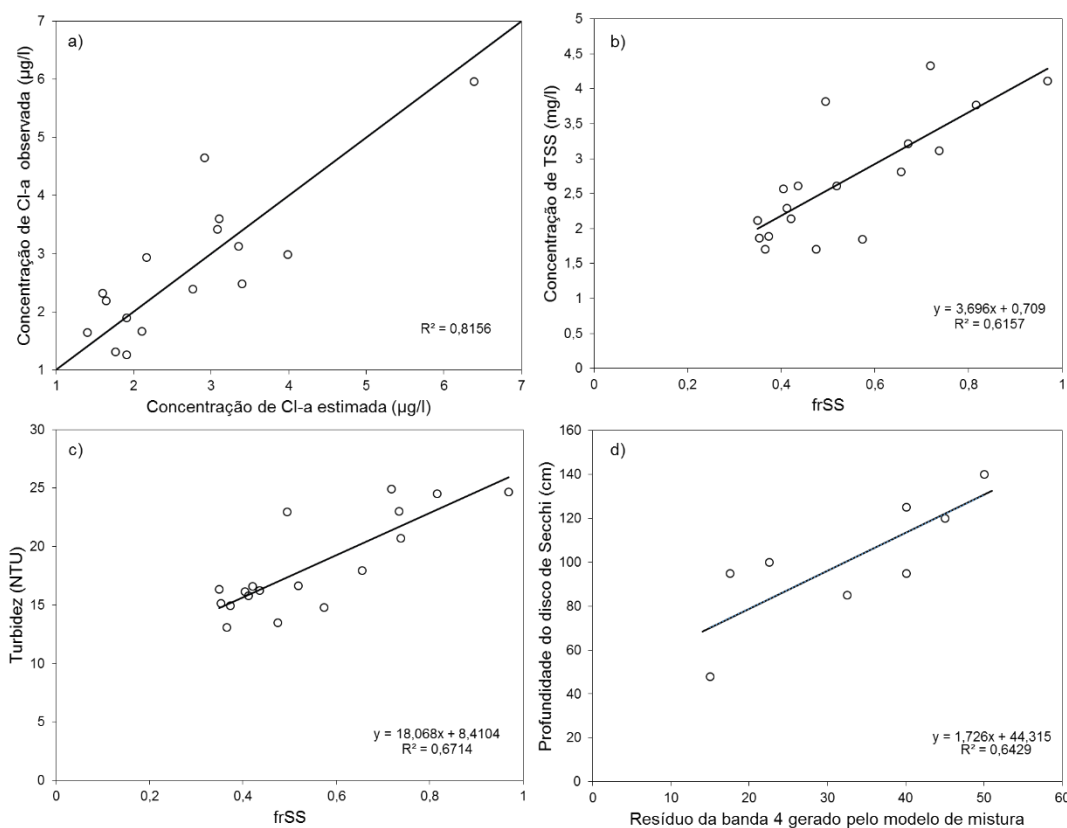


Figura 3. 6: Regressões lineares simples e múltiplas para estimativa de: a) Chl-a; b) TSS; c) Turbidez; e d) Profundidade do DS.

As imagens preditivas de Chl-a, SS e DS são apresentadas na Figura 3.7. Maiores concentrações de Chl-a são encontradas em enseadas rasas, como no Saco do Arraial e no Saco da Mangueira (Figura 3.1). Essas regiões possuem alta produtividade primária devido à baixa profundidade e menor circulação, por estarem relativamente protegidas de eventos de alta energia (Baumgarten *et al.*, 1995). Já as maiores concentrações de SS estão localizadas na região portuária do município de Rio Grande, onde as atividades de dragagem são constantes (Calliari *et al.*, 2009). Apesar de o modelo predizer a profundidade do DS com um erro de cerca de 36% e com baixa confiabilidade, a imagem preditiva parece ser coerente. Menores transparências estão em regiões de maior concentração de sólidos e em enseadas. Setas vermelhas na Figura 3.7c indicam um canal entre bancos de areias que não está nítida nas outras imagens.

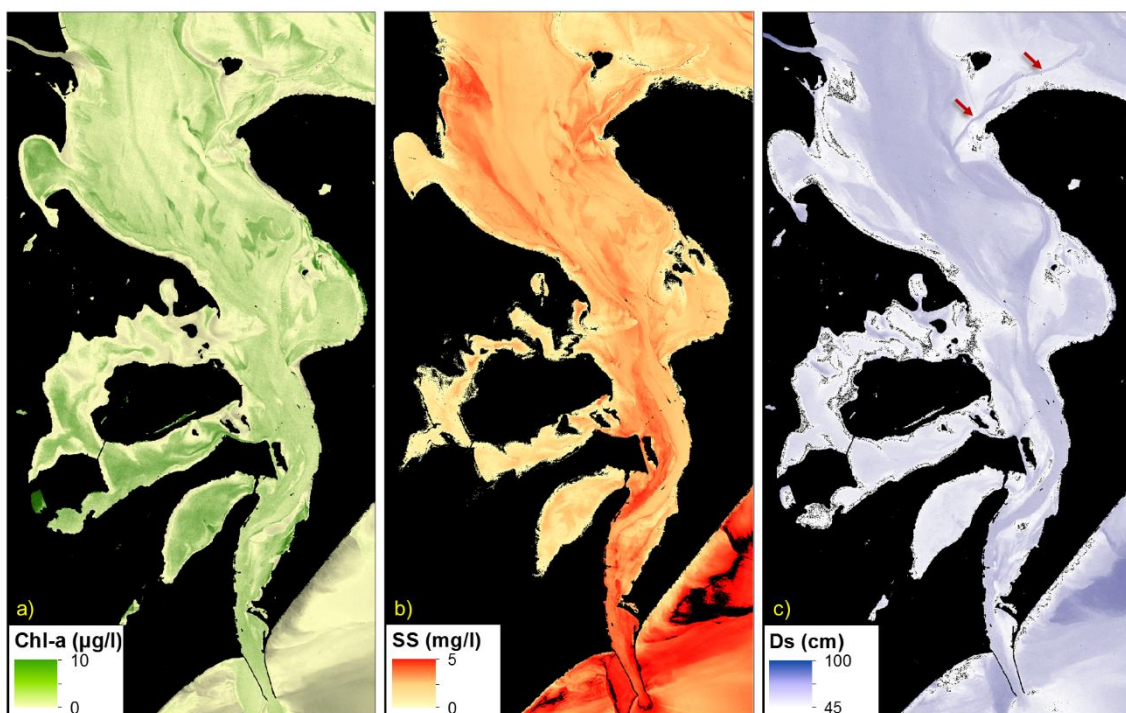


Figura 3. 7: Mapeamento de concentração: a) Chl-a ($\mu\text{g/l}$); b) TSS (mg/l); c) Profundidade do DS (cm).

3.5. Conclusões

Este trabalho mostrou o potencial de dados do satélite Landsat-8 para estimar parâmetros de qualidade de água no estuário da Lagoa dos Patos. Foi possível estimar a concentração de sólidos em suspensão, de clorofila-a, a turbidez e a profundidade do disco de Secchi utilizando regressões lineares entre dados recolhidos *in situ* com as bandas dos sensores OLI e TIRS, e as imagens frações geradas pelo MLME.

A seleção e análise dos *endmembers* considerados no modelo de mistura são fundamentais para um bom desempenho do modelo. O número de *endmembers* é limitado pelo número de bandas e pela distinção dos espectros dos *endmembers*. Assim, não foi possível utilizar todos os *endmembers* identificados, ação que exigiu cautela na interpretação dos resultados. No entanto, o resíduo gerado pelo modelo foi útil para recuperar informações em falta. Os maiores valores de resíduo estão em regiões correspondentes à falta de *endmembers* que represente a clorofila e a água clara. A suposição feita neste trabalho sobre a utilização de *endmembers* representando o componente dominante em vez do componente puro mostrou ser consistente.

A contribuição do fluxo emergente da radiação dos bancos de areia, característicos de áreas costeiras, causou alguns problemas na estimativa dos parâmetros. Entretanto, a abordagem do modelo de mistura mostrou grande potencial

para reduzir a influência dessa condição, evitando superestimativas. Isto ficou evidente quando a imagem fração Areia, derivada do MLME, foi adicionada como uma variável independente na estimativa de Chl-a (R^2 aumentou de 0,55 para 0,81). Outra vantagem de usar imagens frações em modelos empíricos é a redução da dimensionalidade dos dados e a transformação da informação espectral em informação física (proporção de cada componente).

Sugere-se para trabalhos futuros a seleção de *endmembers* do simplex formado por pixels de imagens adquiridas em épocas diferentes. Assim, os *endmembers* poderão representar as características temporais da água. Pode-se considerar dados hiperespectrais para esse tipo de análise para aumentar o número de *endmembers* e a distinção espectral entre eles.

Referências

- Asmus, M. L. 1998. A planície costeira e a Lagoa dos Patos. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C. e Castello, J.P, Ed(s). Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil. Rio Grande: Editora Ecocientia. p. 7-12.
- Alcântara, E., Barbosa, C., Stech, J., Novo, E., e Shimabukuro, Y. 2009. Improving the spectral unmixing algorithm to map water turbidity distributions. *Environmental Modelling & Software*, 24(9), 1051-1061.
- APHA. Clesceri, L.S.; Grrenberg, A.E.; Ealton, A.D. (Eds.). 1998. *Standart Methods for the Examination of Water And Wasterwater*, 20 ed. Washington: APHA-A WWA-WEF.
- Andrade, M. M. Variabilidade temporal e espacial da clorofila a no Estuário da Lagoa dos Patos. 2013, 68 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Augusto-Silva, P. B., Ogashawara, I., Barbosa, C. C., De Carvalho, L. A., Jorge, D. S., Fornari, C. I., e Stech, J. L. 2014. Analysis of MERIS Reflectance Algorithms for Estimating Chlorophyll-a Concentration in a Brazilian Reservoir. *Remote Sensing*, 6(12), 11689-11707.
- Baumgarten, M.G.Z.; Niencheski, L.F.H.; Kuroshima, K.N. 1995. Qualidade das águas estuarinas que margeiam o município de Rio Grande (RS – Brasil): nutrientes e detergente dissolvidos. *Atlântica* (17), p. 17-34. Editora da FURG. Rio Grande.
- Calliari, L. J., Winterwerp, J. C., Fernandes, E., Cuchiara, D., Vinzon, S. B., Sperle, M., Holland, K. T. 2009. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon–Cassino beach sedimentary system. *Continental Shelf Research*, 29(3), 515-529.
- Calliari, L.; Cunha, R. P. E.; Antikeira, J. A. F. 2010. Geomorfologia e dinâmica sedimentar. In: Seeliger, U. e Odebrecht, C., Ed(s). *O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações*. Rio Grande: FURG, p. 31-42.

- Carvalho Jr., O. A. D., Carvalho, A. P. F. D., Guimarães, R. F., Meneses, P. R., Shimabukuro, Y. E. 2003. Mistura espectral:(I) detecção dos membros finais utilizando a geometria do simplex. *Revista Espaço e Geografia*.
- Costa, L. D. F., Wallner-Kersanach, M. 2013. Assessment of the labile fractions of copper and zinc in marinas and port areas in Southern Brazil. *Environmental monitoring and assessment*, 185(8), 6767-6781.
- Emery, K. O., Milliman, J. D., & Uchupi, E. 1973. Physical properties and suspended matter of surface waters in the southeastern Atlantic Ocean. *Journal of Sedimentary Research*, 43(3).
- Gitelson, A. A.; Schalles, J. F.; Hladik, C. M. 2007. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, v. 109, n. 4, p. 464-472.
- Jensen, J. R. 2009 *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres; tradução: José Carlos Neves Epiphanyo et al.(coord.)*. São José dos Campos: Parêntese, 589 p.
- Kirk, J. T. O. 2011. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3 ed. Cambridge: Cambridge University Press. 662 p.
- Landim, Paulo M. Barbosa. 2010. Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático, v. 15, p. 229.
- Ma, W. K., Bioucas-Dias, J. M., Chan, T. H., Gillis, N., Gader, P., Plaza, A. J., Chi, C. Y. 2014. A signal processing perspective on hyperspectral unmixing: Insights from remote sensing. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 31(1), 67-81.
- Mertes, L. A. K., Smith, M. O., Adams, J. B. 1993. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, v. 43, n. 3, p. 281-301.
- Möller, O. e Fernandes, E. Hidrologia e hidrodinâmica. In: Seeliger, U. e Odebrecht, C., Ed(s). 2010. *O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações*. Rio Grande: FURG. p. 17-30.
- Montanher, O. C., Novo, E. M., Barbosa, C. C., Rennó, C. D., Silva, T. S. 2014. 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*, 29, 67-77.
- Morel, A.; Gordon, H. 1980. Report of the working group on water color. *Bondary-Layer Meteorology*, v.18, p. 343-355.
- Novo, E. M. L. M. e Shimabukuro, Y. E. 1994. Spectral Mixture Analysis of Inland Tropical Waters. *International Journal of Remote Sensing*, v. 15, n.6, p. 1351-1356.
- Novo, E. M. L. M. 2001. Comportamento Espectral da Água. In: Meneses, P. R.; Madeira Netto, J. da S. (Org.). *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais*. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, p.203-222.

- Novo, E. M. L. M., Barbosa, C. C. F., Freitas, R. M., Shimabukuro, Y. E., Melack, J. M., Pereira Filho, W. 2006. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. *Limnology*, 7(3), 153-161.
- Pavelsky, T. M. e Smith, L. C. 2009. Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada, *Water Resour. Res.*, v. 45, n 11417.
- Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J. M., Sagarminaga, Y. 2010. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*, 30(5), 379-392.
- Rodrigues, J. P. 2014. Caracterização bio-óptica das águas do estuário da Lagoa dos Patos, RS – Brasil. 2014, 116 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Rudorff, C. M. 2006. Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrorradiômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos. 2006, 138 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Rudorff, C. M., Novo, E. M. L. M., Galvão, L. S. 2006. Spectral mixture analysis for water quality assessment over the Amazon floodplain using Hyperion/EO-1 images. *Revista Ambiente e Água—An Interdisciplinary Journal of Applied Science*: v, 1(2).
- Schowengerdt, R. A. 2006. Remote sensing: models and methods for image processing. Academic press.
- Souza, J. D. D., Silva, B. B. D. 2005. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4), 349-358.
- Souza, R. B., Lorenzetti, J. A., Lucca, E. V. D. 2009. Estimativas da temperatura da superfície do mar através do sensoriamento remoto no infravermelho. In: De Souza, R. B. (Ed.). *Oceanografiap por satélites*. São Paulo: Oficina de Textos. p. 102-116.
- Somers, B., Asner, G. P., Tits, L., Coppin, P. 2011. Endmember variability in spectral mixture analysis: A review. *Remote Sensing of Environment*, 115(7), 1603-1616.
- Shi, W. e Wang, M. 2009. Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008. *Geophysical research letters*, v. 36, n. 7.
- Shimabukuro, Y. E. e Smith, A. 1991. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, v. 29, n. 1, p. 16-20.
- Tyler, A. N., Svab, E., Preston, T., Présing, M., & Kovács, W. A. 2006. Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*, 27(8), 1521-1537.
- USGSa. U.S. 2015. Product guide: Provisional landsat 8 surface reflectance product. Version 1.5, July. 2015. Department of the Interior - U.S. Geological Survey – NASA. Disponível em:

- <http://landsat.usgs.gov/documents/provisional_l8sr_product_guide.pdf>. Acesso em 01/09/2015.
- USGSb. 2015. Landsat 8. Data User's Handbook. Version 1.0, June, 2015. Department of the Interior - U.S. Geological Survey - NASA. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>. Acesso em 01/09/2015.
- Yacobi, Y. Z. ; Moses, W. J.; Kaganovsky, S. Sulimani, B.; Leavitt, B. C. Gitelson, A. 2011. A NIR-red reflectance-based algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study, *Water Research*, v.45,n.7,p.2428-2436.
- Zanotta, D. C., Haertel, V., Shimabukuro, Y. E., Daleles Renno, C. 2014. Linear Spectral Mixing Model for Identifying Potential Missing Endmembers in Spectral Mixture Analysis. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 52(5), 3005-3012.
- Zhang, M., Dong, Q., Cui, T., Xue, C., Zhang, S. 2014. Suspended sediment monitoring and assessment for Yellow River estuary from Landsat TM and ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 146, 136-147.
- Zimba, P. V.; Gitelson, A. 2006. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Aquaculture*, v. 256, n. 1, p. 272-286.

CAPÍTULO 4: Considerações finais

Nesse trabalho foi realizada a caracterização espaço-temporal dos SS na Lagoa dos Patos por meio do produto MOD09Q1 (sensor MODIS). Sua avaliação foi feita com dados auxiliares e considerando os diferentes tipos de SS presentes. A maior concentração de SS ocorre em novembro, associada a ventos de NE com alta descarga. Já a menor concentração em maio está associada a ventos de SO e baixa descarga. Ao longo da laguna e no estuário a reflectância varia ao longo do ano, devido possivelmente à sedimentação, ao empilhamento da água e à ressuspensão de SS. As relações causa-efeito devem ser confirmadas por trabalhos futuros, como por exemplo, a modelagem hidrodinâmica/sedimentos da laguna.

Os dados MODIS apresentaram grande potencial para avaliação qualitativa dos SS na Lagoa dos Patos. Diferentes tipos de SS alteram a intensidade da reflectância e a informação quantitativa, a partir da estimativa com dados *in situ*, deverá ser feita considerando os diferentes tipos de SS. Isso será um desafio para futuros trabalhos. Entretanto

A partir do MLME foi possível separar as massas de água dominadas de COAs e de areia de fundo no estuário da Lagoa dos Patos. Os resultados, em termos de proporção, foram usados para mapeamento da composição da água e em modelos empíricos para estimativa de parâmetros da água. O modelo apresenta grande potencial para separação espectral dos COAs quando aplicado ao sensor OLI/Landsat-8.

As vantagens da utilização do MLME, apresentados nesse trabalho, são: i) facilidade em compreender e interpretar as imagens frações; ii) remoção/diminuição da contribuição da radiação refletida pelo fundo que superestima os parâmetros da água; iii) redução da dimensionalidade dos dados usados nos modelos empíricos; iv) utilização do resíduo do MLME para recuperação de parâmetros. Já as dificuldades e limitações são: i) definir *endmembers* que sejam “puros”; ii) selecionar quais *endmembers* devem ser usados no modelo de mistura, devido tanto a restrição ao número quanto a semelhança nos espectros.

A dificuldade de obtenção de imagens sem cobertura de nuvens impossibilitou a avaliação temporal da composição da água a partir do MLME. Sugere-se, para trabalhos futuros, a definição de *endmembers* em imagens de diferentes épocas para aumentar a representatividade da composição da água, tornando possível a avaliação das imagens frações temporalmente.

Referências

- Andrade-Neto, J. S.. 2011. Descarga sólida em suspensão no sistema guaíba, rs, e sua variabilidade temporal. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do sul. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS.
- Asmus, M. L. 1998. A planície costeira e a Lagoa dos Patos. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C. e Castello, J.P, Ed(s). Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil. Rio Grande: Editora Ecoscientia. p. 7-12.
- Ávila, R. A. 2013. Distribuição do material particulado em suspensão e suas inter-relações com diferentes propriedades no estuário da Lagoa dos Patos. 91p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica) - Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Instituto de Oceanografia. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Bajjouk, T., J. Populus, B. 1998. Guillaumont. Quantification of subpixel cover fractions using principal component analysis and a linear programming method: application to the coastal zone of Roscoff (France). *Remote Sensing of Environment*, v. 64, n. 2, p. 153-165.
- Baumgarten, M.G.Z.; Niencheski, L.F.H.; Kuroshima, K.N. 1995. Qualidade das águas estuarinas que margeiam o município de Rio Grande (RS – Brasil): nutrientes e detergente dissolvidos. *Atlântica* (17), p. 17-34. Editora da FURG. Rio Grande.
- Castelão, R. M., Möller Jr, O. L. 2003. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 25(2):91-106.
- Gianasi, B. L., Oliveira, A. D. O. D., & Copertino, M. D. S. 2011. Caracterização Espectral da Água e da Vegetação Aquática Submersa no Estuário da Lagoa dos Patos (RS, Brasil). In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE. p. 7051-7058
- Hartmann, C. 1988. Utilização de dados digitais do TM para a obtenção dos padrões de distribuição do material em suspensão na desembocadura da Laguna dos Patos, RS. SJC/SP, Dissertação de Mestrado, INPE, 190p.
- Hartmann, C., e Schettini, C. 1991. Aspectos hidrológicos na desembocadura da Laguna dos Patos, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(4), 371–377.
- Hartmann, C. 1996. Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da Laguna dos Patos, RS. Curso de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, UFRGS. Doutorado, 363.
- Herz, R. 1977. Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos. Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos. 722p. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Jensen, J. R. 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres; tradução: José Carlos Neves Epiphanyo et al.(coord.). São José dos Campos: Parêntese. 589 p.

- Jorge, D. S. F. 2013. Caracterização espectral das imagens de cor do oceano durante florações de fitoplâncton na Lagoa dos Patos. 2013. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21134/tde-09042014-175320/>>. Acesso em: 2014-11-21.
- Kjerfve, B. 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: Estuarine variability. New York: Academic Press. p. 63-81.
- Kim, T. S., Park, K. A., Li, X., Lee, M., Hong, S., Lyu, S. J., e Nam, S. 2015. Detection of the Hebei Spirit oil spill on SAR imagery and its temporal evolution in a coastal region of the Yellow Sea. *Advances in Space Research*, 56(6), 1079-1093.
- Kirk, J. T. O. 2011. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3 ed. Cambridge: Cambridge University Press. 662 p.
- Kirchhof, P. A. 2015. A contribuição de sedimentos terrígenos dos rios Jacuí e Guaíba para o Sistema Lagunar (Lagoa Dos Patos) do RS. Monografia (trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências, Porto Alegre, RS.
- Kutser, T. 2004. Quantitative detection of chlorophyll in cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 49(6), 2179-2189.
- Lobo, F. D. L., Barbosa, C. C. F., Novo, E. M. L. D. M., Yunes, J. S. 2009. Mapping potential cyanobacterial bloom using Hyperion/EO-1 data in the Patos Lagoon estuary.
- Long, C. M., Pavelsky, T. M. 2013. Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. *Remote Sensing of Environment*, 129, 197-209.
- Mantovani, J. E. 1993. Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e matéria inorgânica particulada. 1993, 119p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Mendes, C. A. B., Haertel, V., Hartmann, C., Centeno, J. A. S. 1990. Estimativa de parâmetros de qualidade de água através de técnicas de sensoriamento remoto e métodos de análise multivariada. In: Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 6. (SBSR), Manaus. Anais... São José dos Campos: INPE, p. 840-849.
- Mendes, R., Vaz, N., Fernández-Nóvoa, D., da Silva, J. C. B., Gómez-Gesteira, M., Dias, J. M. 2014. Observation of a turbid plume using MODIS imagery: The case of Douro estuary (Portugal). *Remote Sensing of Environment*, 154, 127-138.
- Montanher, O. C., Novo, E. M., Barbosa, C. C., Rennó, C. D., Silva, T. S. 2014. 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*, 29, 67-77.
- Möller O. O., Castaing P, Salomon JC, Lazure P. 2001. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*. 24:297-311.

- Möller, O. O., Fernandes, E. 2010. Hidrologia e hidrodinâmica. In: Seeliger, U. e Odebrecht, C., Ed(s). O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações. Rio Grande: FURG. p. 17-30.
- Moller, O. O., Stech, J., Math, M. M. 1996. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, 16(3), 335-351.
- Novo, E. M. L. M. 2001. Comportamento Espectral da Água. In: Meneses, P. R.; Madeira Netto, J. da S. (Org.). Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, p.203-222.
- Nicolodi, J. L.; Toldo Jr, E. E.; Farina, L.. 2010. Dinâmica e ressuspensão por ondas no Lago Guaíba (RS, Brasil) e implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano. *Pesquisas em Geociências*, v. 37, n. 1, p. 25-39.
- Rudorff, C. M. 2006. Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrorradiômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos. 2006, 138 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Shi, W., Wang, M. 2009. Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008. *Geophysical Research Letters*, 36(7).
- Pereira, R.S. Processos que regem a qualidade da água na Lagoa dos Patos, segundo o modelo DELFT3D. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Fundação Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande: 2003. 150p.
- Tundisi, M.T. 2008. Limnologia. São Paulo: Oficina de Textos. 631 p. *Soils and Sediments*, 2(4), 216-222.
- Villar, R. E., Martinez, J. M., Guyot, J. L., Fraizy, P., Armijos, E., Crave, A., Lavado, W. 2012. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *Journal of hydrology*, 444, 221-228.
- Yacobi, Y. Z., Moses, W. J.; Kaganovsky, S. Sulimani, B.; Leavitt, B. C. Gitelson, A. A. 2011. NIR-red reflectance-based algorithms for chlorophyll-a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake Kinneret case study, *Water Research*, v.45,n.7,p.2428-2436.
- Zanotta, D. C., Ducati, J., Gonçalves, G. A. 2010. Surface temperature patterns of Lagoa dos Patos, Brazil, using NOAA-AVHRR data: an annual cycle analysis. *Pesquisas em Geociências*, 37(3), 219-226.