

Dinâmica espacial e temporal de sedimentos em suspensão na região estuarina da Lagoa dos Patos - RS, a partir de dados do sensor OLI, Landsat-8

Alice César Fassoni-Andrade¹
Laurindo Antonio Guasselli¹
Gustavo Rodrigues Toniolo¹
Adriana Aparecida Moreira¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/PPGSR
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Campus do Vale. Bairro Agronomia
CEP: 91501-970 - Porto Alegre- RS, Brasil

{alice.fassoni, gustavotoniolo1, moreiradriana00}@gmail.com, laurindo.guasselli@ufrgs.br

Abstract. Transport of sediments in an estuary depends on the discharge from the rivers that drain the estuary and on meteorological conditions, which define the local circulation. Suspended solids modify the spectral response of water, making their observation from images of orbital sensors possible. This study proposes to evaluate the temporal and spatial variation of the suspended sediments in Patos Lagoon estuary, using the OLI sensor, Landsat-8 satellite. Atmospheric and radiometric correction was realized for eight images from June 2013 to February 2014. The band 4, correspondent to the red wavelength, was segmented in 15 intervals of reflectance. In the winter, when winds from the south and southwest with high-speed predominates, the reflectance is small, indicating the entrance of water from the ocean in the estuary. The largest reflectance in the period of spring and summer is related to the transport of suspended sediments towards the exit of the estuary due to the predominance of winds from the northeast. Is possible to visualize the contribution of discharges from São Gonçalo's channel, which is highest from June to November and lowest from December to February. Local variations, such high rainfall and change in wind direction, can cause unexpected changes in flow sediments. The concentration of suspended solids in the Patos Lagoon estuary presents spatial and temporal variations and is related to discharges from the rivers, rainfall, speed wind direction and meteorological tide. Data in situ is needed for the quantification of sediment.

Palavras-chave: remote sensing, estuary, variability solids, water, sensoriamento remoto, estuário, variabilidade, sólidos, água.

1. Introdução

Estuários são ecossistemas aquáticos com alta produtividade, diversidade de fauna e flora e muitos nichos alimentares para animais herbívoros, carnívoros e detritívoros (Tundisi, 2008). Em razão disso, são consideradas importantes zonas pesqueiras e potencialmente explorados pelo homem.

A composição dos sedimentos de lagos ou estuários é variável de acordo com a cobertura e uso do solo na bacia de drenagem e as condições físico-químicas do ambiente, como pH e salinidade, e das atividades realizadas, como pesca e navegação. Há uma grande variedade de matéria orgânica, nutrientes para diversos organismos, sólidos inorgânicos, além de possíveis poluentes, como metais pesados adsorvidos (Esteves, 1998).

Dessa forma, o transporte ou a deposição desses sedimentos torna-se importante no ciclo ecológico e no metabolismo desses ambientes. Esse mecanismo é dependente da circulação, da velocidade de sedimentação das partículas, da descarga de material pelos rios que deságuam no estuário e pela diferença da força do rio e do mar que provocam gradientes de salinidade (Tundisi, 2008).

Por sua vez, a movimentação da água depende de diversas forças e das características físicas da lagoa ou estuário. Ventos, dependendo da direção, velocidade e "feth", podem manter sedimentos finos em suspensão ou ainda, provocar uma diferença de nível. Da mesma forma, a precipitação pode causar ressuspensão e aumento do fluxo. A temperatura, associada a outros fatores, gera gradientes de densidade e estratificação ao longo da coluna d'água.

Entender a dinâmica espacial e temporal dos sólidos em suspensão como, velocidade, direção, composição e concentração é importante para gerenciamento desses ecossistemas (Shi e Wang, 2009). É comum o monitoramento *in situ* desses ambientes com elevada precisão. Entretanto essas informações são restritas no espaço e no tempo e podem não permitir a avaliação de grandes extensões ou de forma sistemática.

O sensoriamento remoto tem sido aplicado com êxito em ambientes fluviais para monitorar a variação espacial e temporal da qualidade da água, verificando a origem, o deslocamento de substâncias específica e compreender seus efeitos sobre os processos climáticos.

Vários autores determinaram a concentração de sólidos em suspensão, utilizando bandas espectrais do sensor TM (Mendes, 1990); do sensor MSS (Otávio, 2010); do Landsat e do MODIS-Aqua (Shi e Wang, 2009; Jorge, 2013; Caroline, 2010), ou, mais de uma banda e/ou aritmética de bandas, por exemplo, razão e somatório de bandas, (Pavelsky e Smith, 2009; Otávio, 2010; Mertes, 1993, Zang, 2009) encontrando correlações satisfatórias. A faixa do vermelho é mais utilizada já que as partículas em suspensão provocam um aumento da refletância da água com o aumento da concentração e o máximo de reflectância ocorre em 500 e 700 nm (Novo, 2001).

Dessa forma, esse estudo propõe-se analisar a variação temporal e espacial da carga de sedimentos em suspensão no estuário da Lagoa dos Patos utilizando a faixa do vermelho (640 nm a 670 nm) do sensor *Operational Land Imager* (OLI), a bordo do satélite Landsat 8, para o período de junho de 2013 a fevereiro de 2014.

2. Área de estudo

A Lagoa dos Patos é a maior laguna costeira do mundo (Kjerfve, 1986). Com uma área de 10.227 km² ela se estende na direção NE-SW entre a Latitude 30° S e 32° S e Longitude 50° O e 52° O, apresenta uma profundidade média de 5 m, largura máxima de 59,8 km e eixo principal de 180 km (Asmus, 1998).

O Oceano Atlântico está conectado com o sul da Lagoa por um único canal de 20 km de comprimento e 0,5 a 3 km de largura formando uma área estuarina (Figura 1), que pode ficar restrita à desembocadura na Barra do Rio Grande ou se estender até a parte norte da Lagoa, correspondendo a uma área de 971 km² (10% da lagoa) (Asmus, 1998; Möller e Fernandes, 2010). No canal do Norte a profundidade pode chegar a 18 m (Calliari, 2010).

Aproximadamente 85% da água da lagoa é proveniente das bacias do Guaíba, Camaquã e do Canal de São Gonçalo, que deságuam pela região norte, central e sul da lagoa, respectivamente (Garcia, 1998). A Lagoa Mirim, através do Canal de São Gonçalo, tem seu fluxo para a Lagoa dos Patos variado, já que barragens artificiais no canal impedem a penetração de água salgada para a Lagoa Mirim e somente em períodos de grande acumulação de água (inverno e primavera) estas barragens são abertas (Garcia, 1998).

A relação entre a direção do vento e o transporte dos sedimentos na Lagoa dos Patos é descrita em Marques et al. (2006). Esses autores simularam o comportamento da pluma da Lagoa dos Patos no Oceano Atlântico, e concluíram que os ventos atuam como o principal fator forçante no destino dos sedimentos. Ventos de nordeste contribuem para o transporte em direção ao sul da lagoa e espalhamento da carga de sedimentos. Ventos de sudeste-leste podem não condicionar a saída no canal do estuário. Estes ventos sopram ao longo do eixo principal da Lagoa e controlam decisivamente a circulação, a distribuição de salinidade e os níveis de água.

A descarga fluvial também influencia no gradiente de salinidade e na circulação na região do estuário. A salinidade decresce com o aumento da descarga fluvial, pois as águas continentais são rapidamente forçadas em direção à desembocadura do estuário, controlando o avanço de águas salinas ou impedindo a salinização da laguna (Möller e Fernandes, 2010).

A região é caracterizada por um alto índice de precipitação pluviométrica que proporciona um transporte considerável de silte e argila de várias fontes da bacia de drenagem para o estuário (Martins, 1963; Calliari, 1998).

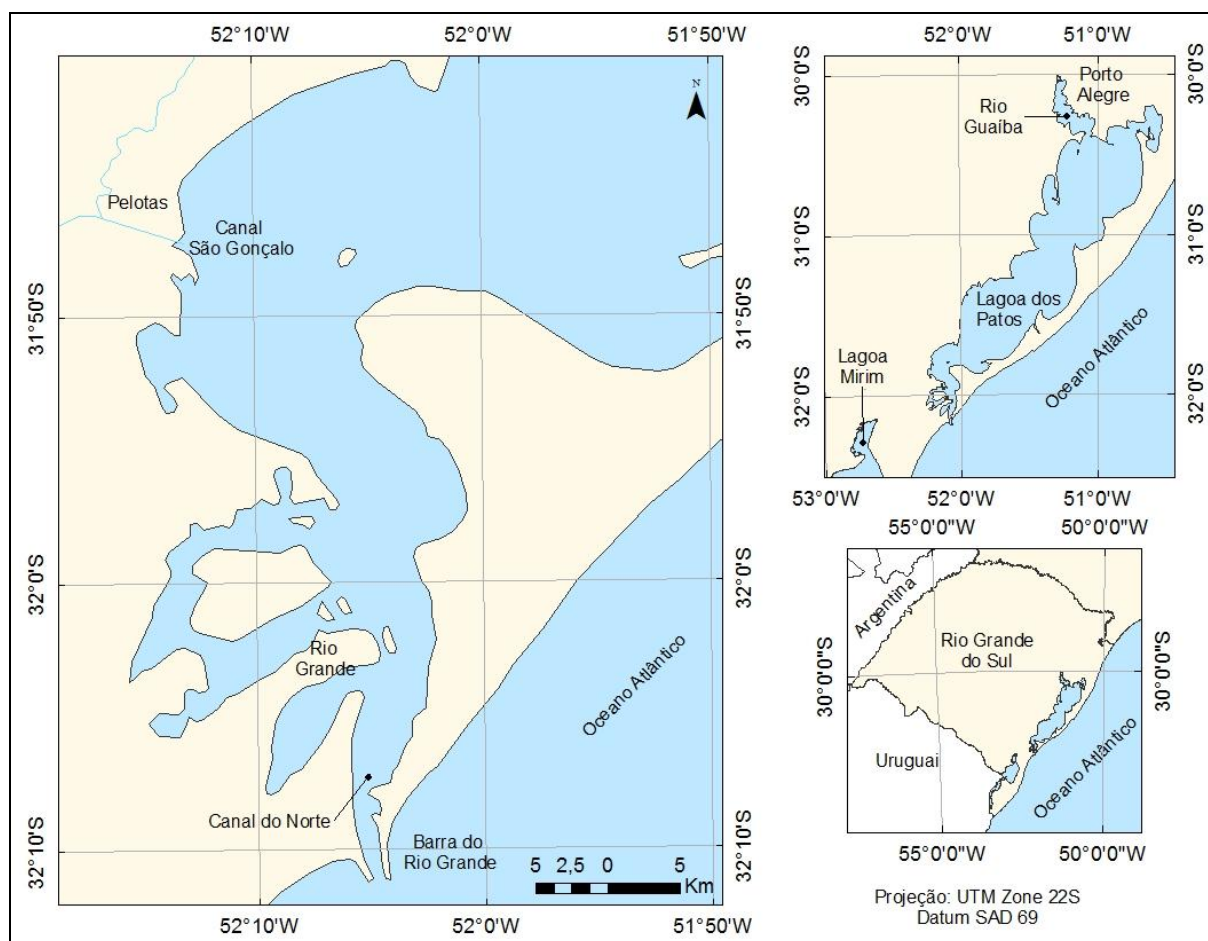


Figura 1. Localização do estuário da Lagoa dos Patos.

3. Metodologia

Foram utilizadas oito imagens provenientes do satélite Landsat-8, sensor OLI, órbita/ponto 221/82. Devido à cobertura de nuvens e a disponibilidade de imagens desse satélite, que entrou em operação em 2013, o período da análise ficou restrito a junho de 2013 a fevereiro de 2014. As características das imagens e as informações sobre direção predominante do vento provenientes das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas em Pelotas e Rio Grande são apresentadas na Tabela 1.

As imagens foram convertidas em radiância e, posteriormente, em reflectância. A correção atmosférica foi realizada no FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), pelo modelo Modtran4+. A banda 4, correspondente ao comprimento de onda do vermelho (640 nm a 670 nm), foi segmentada em intervalos de reflectância de 1% definindo 15 classes. A paleta de cores utilizada varia de azul (1% da reflectância) ao vermelho (15% da reflectância).

A diferença normalizada entre a banda correspondente ao verde e a banda correspondente ao infravermelho próximo, proposto por McFeeters (1996) e denominado de NDWI (*Normalized Difference Water Index*), realça a água em relação aos outros alvos. O NDWI varia de -1 a 1, sendo que valores positivos (0 a 1) indicam alvos com reflectância no verde maior em relação ao infravermelho próximo, e valores negativos (-1 a 0) indicam alvos com reflectância no infravermelho próximo maior em relação ao verde.

Os dados de reflectância da água da banda 4 foram isolados dos alvos solo e vegetação utilizando uma máscara booleana: valores de NDWI positivos recebem 1 e valores negativos recebem 0.

Tabela 1. Imagens utilizadas na segmentação da reflectância

Imagem	Data	Estação do ano	Direção do vento (Pelotas)*	Direção do vento (Rio Grande)*
Landsat 8 OLI órbita/ponto 221/82	27-06-2013	Inverno	Sudoeste	Sul
	30-08-2013	Inverno	Sudoeste	Sul
	01-10-2013	Primavera	Sudoeste	Leste
	18-11-2013	Primavera	Nordeste	Nordeste
	04-12-2013	Primavera	Nordeste	Nordeste
	05-01-2014	Verão	Nordeste	Nordeste
	21-01-2014	Verão	Nordeste	Sudeste
	22-02-2014	Verão	Nordeste	Nordeste

*Direção predominante do vento para o período de 15 dias anteriores a data de aquisição da imagem.

4. Resultados e Discussão

A máscara criada para delimitar a Lagoa dos Patos utilizando o NDWI apresentou um resultado satisfatório. Entretanto, como valores positivos do NDWI consideram também as áreas úmidas, algumas regiões alagadas, devido à precipitação elevada ou à irrigação de arroz, foram delimitadas. A máscara da imagem do mês de novembro, com áreas alagadas, é comparada com a máscara da imagem do mês de janeiro na Figura 2.

Além disso, na imagem do dia 5 de janeiro de 2013, na parte norte do estuário, há uma região dentro da lagoa com grande concentração de clorofila que não foi considerada pela máscara, já que a clorofila apresenta maior reflectância na faixa do infravermelho próximo em relação ao verde (Figura 3).

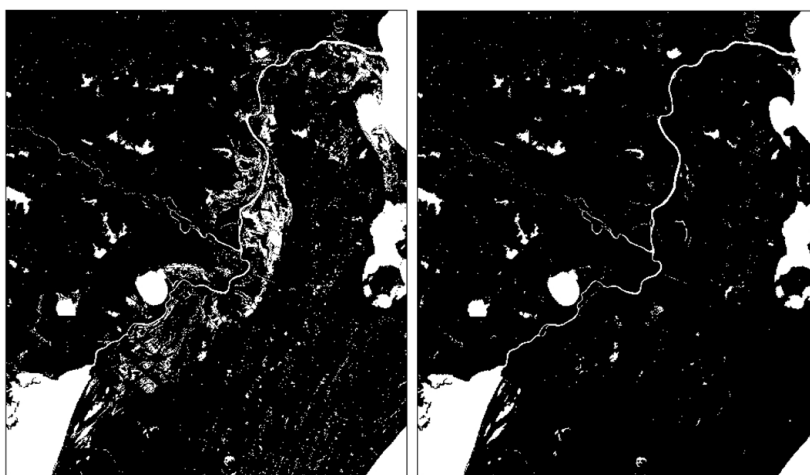


Figura 2. Máscara criada a partir do NDWI do mês de a) novembro e b) janeiro.

A série temporal de imagens, Figura 4, representa a variação da reflectância na faixa do vermelho (640 nm a 670 nm). A maior reflectância está relacionada com a maior carga de sólidos inorgânicos em suspensão.

Os maiores valores de reflectância se encontram na parte superior do estuário onde a circulação é provocada principalmente pela ação dos ventos e o maior aporte de sedimentos

são provenientes da região norte da lagoa. Na região do canal do estuário a variação espacial e temporal da reflectância é maior devido a entrada da água do oceano, provocando uma mistura de águas.

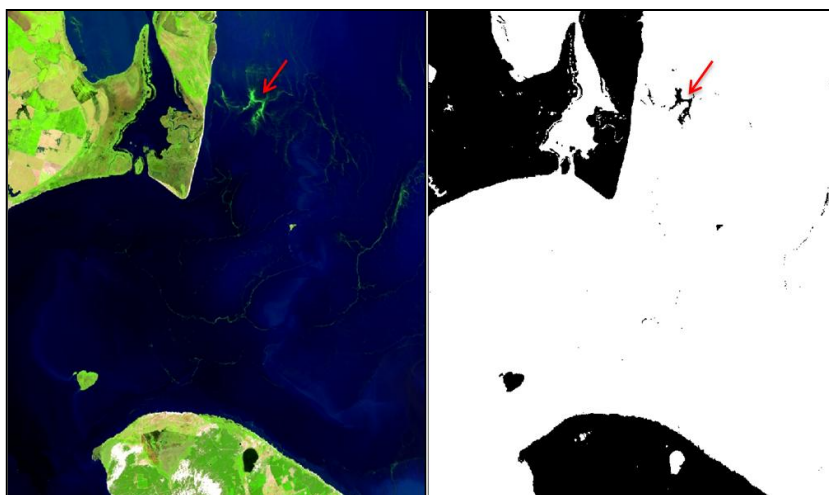


Figura 3. (a) Imagem Landsat 8 de 05/01/2013, composição R6G5B4; b) Máscara criada a partir do NDWI. A seta em vermelho indica a presença de clorofila

Segundo Möller e Fernandes (2010), há uma predominância na região de ventos de nordeste, de setembro a março, e ventos de sul/sudoeste, de abril a agosto. Sendo que, a velocidade do vento é maior em maio e junho ($1,5 \text{ m.s}^{-1}$). Ainda, descargas fluviais acima da média ocorrem de maio a outubro e baixas descargas de novembro a abril.

No inverno, quando predominam ventos de sul e sudoeste com elevada velocidade (INMET) e alta descarga fluvial, há entrada de água do oceano no estuário. Isso é observado nas imagens de junho e agosto de 2013 (Figura 4ab), onde a reflectância é menor. Também é possível visualizar a carga de sedimentos (reflectância de 6% a 8%) proveniente do canal de São Gonçalo.

A contribuição de sólidos em suspensão proveniente do canal São Gonçalo é maior no período de junho a novembro de 2013 (Figura 4abcd) em relação a dezembro de 2013 a fevereiro de 2014 (Figura 4efgh).

Ventos de nordeste, de outubro a fevereiro (INMET), forçam os sedimentos para a saída do estuário provocando significativa diferença de nível ao longo do eixo da lagoa. A elevada reflectância (8% a 15%) nas imagens de outubro de 2013 a fevereiro de 2014 (Figura 4cdefgh) indica a predominância do transporte nesta direção.

Apesar de ventos predominantes de nordeste em 5 de Janeiro (Figura 4f) que empurram os sedimentos para fora do estuário, a precipitação acumulada e a velocidade do vento nos dias que antecederam a data da aquisição da imagem foram baixas, indicando uma condição de calmaria. A pluma proveniente do canal de São Gonçalo se dispersa mais no estuário, evidenciando a menor ação do vento. Na parte superior da lagoa a reflectância ainda é elevada.

Em 18 de novembro (Figura 4d), mês que também tem predominância de ventos de nordeste, 4 dias antes da data da aquisição da imagem, ocorreram ventos de sul/leste/sudoeste provocando um represamento dos sólidos provenientes do canal de São Gonçalo na margem superior e uma baixa reflectância no sul do estuário, indicando entrada da água do oceano. Além disso, a elevada reflectância (14% e 15%), ou seja, elevada carga de sólidos, para essa data (Figura 4d), pode ser explicada por uma precipitação 75% a 100% acima do normal (desvio de 110,9 mm para a estação de Pelotas) na região leste da bacia do Camaquã e norte da bacia Mirim-São Gonçalo, no mês de outubro de 2013 (CEMETRS, 2014). Um alto nível

de precipitação provoca um aumento de nível e maior transporte de sedimentos por proporcionar perda de material na bacia de drenagem.

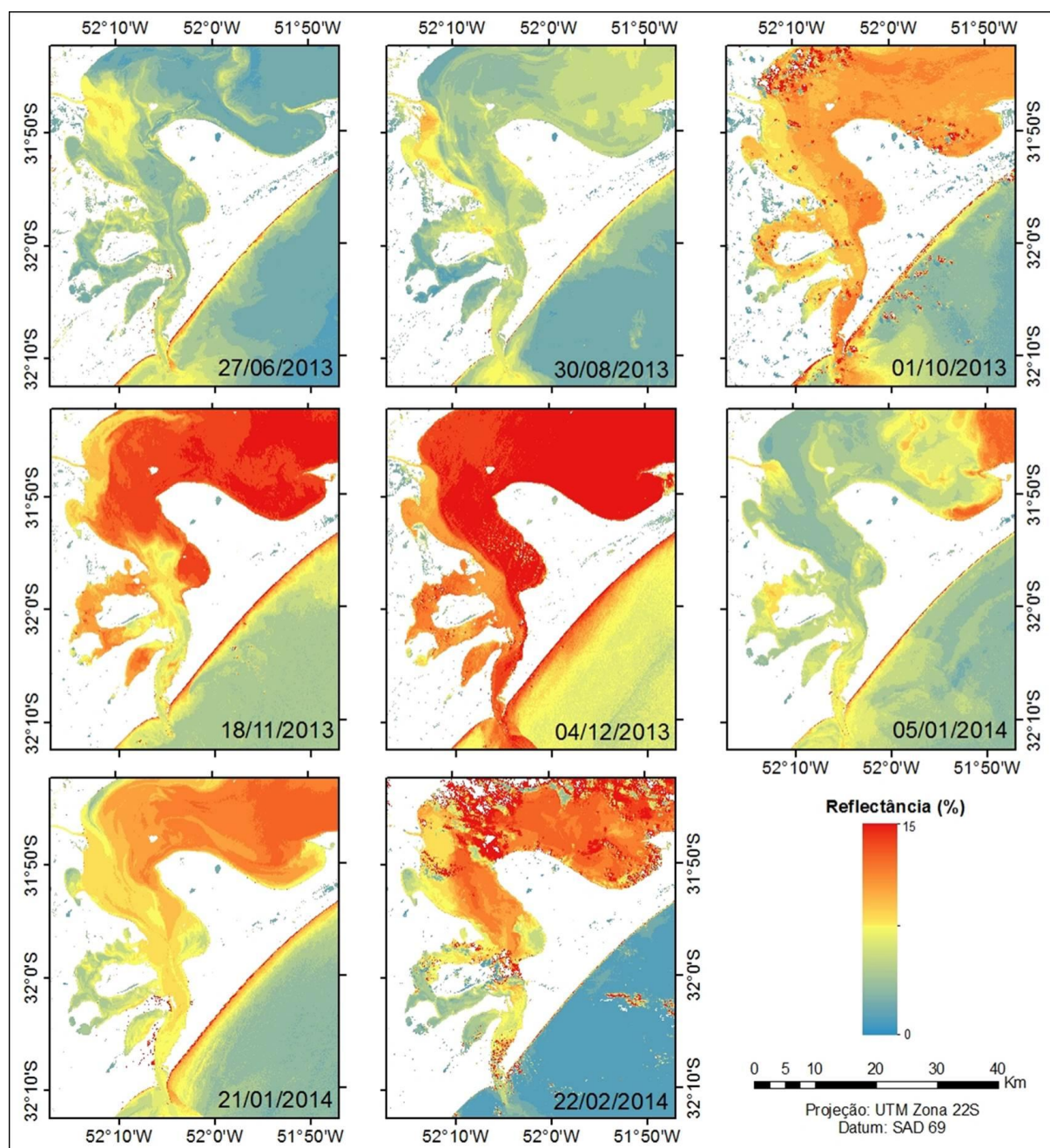


Figura 4. Reflectância na faixa do vermelho do estuário da Lagoa dos Patos. a) 27/06/2013; b) 30/08/2013; c) 01/10/2013; d) 18/11/2013; e) 04/12/2013; f) 05/01/2014; g) 21/01/2014; h) 22/02/2014.

5. Conclusões

A reflectância na faixa do vermelho no estuário da Lagoa dos Patos apresenta variação espacial e temporal. Observa-se que nos períodos com predominância de ventos de nordeste a reflectância é maior devido ao transporte de sedimento em direção ao sul da lagoa. Ventos predominantes de sul e sudoeste provocam a entrada de água do mar no estuário diminuindo a reflectância.

Verifica-se também a contribuição do canal de São Gonçalo no estuário, principalmente no inverno onde a descarga é maior e há predominância de ventos de sul e sudoeste.

Variações locais, como precipitação elevada e mudança na direção dos ventos, podem provocar alterações no fluxo de sedimentos fora da tendência esperada.

Embora este estudo tenha grande valor para compreender a variação espacial e temporal dos sedimentos no estuário da Lagoa dos Patos é necessário uma validação com dados *in situ* para quantificar a carga de sedimentos em suspensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Fapergs), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto – UFRGS pelo apoio e incentivo.

Referências

Asmus, M. L. 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, 1998. p. 7-12.

Calliari, L., Cunha, R. P E Antikeira, J. A. F. 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, 2010. p. 31-42.

Calliari, L.. 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, 1998. p. 13-17.

Caroline, P., *et al.*. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 5, p 379-392, 2010

CEMETRS: Centro Estadual de Meteorologia. **Boletim Meteorológico do Estado do Rio Grande do Sul, Outubro/2013**. Disponível em <http://www.cemet.rs.gov.br/upload/20131209150858boletim_2013_10.pdf>. Acesso em: 7.out.2014.

Esteves, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 601 p.

Garcia, C. A. E. 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, 1998. p. 18-20.

Jorge, Daniel Schaffer Ferreira. **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, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21134/tde-09042014-175320/>>. Acesso em: 2014-10-31.

Kjerfve, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. **Estuarine variability**. New York: Academic Press, 1986. p. 63-81.

Marques et al (2006). **A dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos, Brasil**. In: Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, II, 2006. Rio Grande. *Anais...* FURG. 1998. sp.

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

Mendes, C. A. B.; Haertel, V.; Hartmann, C.; Centeno, J. A. S. **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), 1990, Manaus. Anais... São José dos Campos: INPE, 1990. p. 840-849

Mertes, L. A. K., *et al.* 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, 1993.

Möller, O. e Fernandes, E. Hidrologia e hidrodinâmica. In: Seeliger, U. e Odebrecht, C., Ed(s). **O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações**. Rio Grande: FURG, 2010. p. 17-30.

Novo, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (Org.). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001, p.203-222.

Otávio C. M. **Modelos empíricos para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão em rios amazônicos de águas brancas a partir de imagens landsat 5**. 2013, 145 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2013.

Pavelsky, T. M. e Smith, L. C. Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada, **Water Resour. Res.**, 45, W11417, doi:10.1029/2008WR007424. 2009

Seeliger, U. Introdução. In: Seeliger, U. e Odebrecht, C., Ed(s). **O estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações**. Rio Grande: FURG, 2010. p. 11-17.

Shi, W. e Wang, M.. Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008. **Geophysical research letters**, vol 36, L07607. 2009

Tundisi, M.T. e Tundisi, J. G. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2008. 632 p.

Zang, M., *et al.*.Suspended sediment monitoring and assessment for Yellow River estuary from Landsat TM and ETM+ imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 146, p 136-147. 2014