

Uso de imagens LISS-III para a caracterização espectral da pluma do Rio Paraíba do Sul

Aline de Matos Valerio¹
Milton Kampel¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{alineval, milton}@dsr.inpe.br

Abstract. River plumes are responsible for discarding organic matter and inorganic particulate sediment in the adjacent coastal region. According to the kind of optically active constituents and environmental interaction such as winds and precipitation, this discharged material shows distinct spectral response, making possible the acquisition of information through remote sensing. The LISS-III sensor onboard the Indian Resourcesat 1 satellite has similar features such as the Landsat 5 TM sensor, representing a viable alternative for the continuity of many remote sensing applications mainly after Landsat 5 ended operation in 2012. This work aimed to use LISS-III images to characterize the optically active constituents associated with the River Paraíba do Sul plume. As far as we know, this is the first time that LISS-III is used for this kind of research in Brazil. Geographical, radiometric and atmospheric corrections were applied to four LISS-III images and hereafter were classified using the Maximum Likelihood and Linear Spectral Unmixing methods. The results showed that the LISS-III sensor provides useful images to be used to study the water body of the river plume. The resulting classes from the Maximum Likelihood classification were well defined and separated and the Linear Spectral Unmixing method helped to achieve a qualitative description of the spatial distribution of the optically active components. In conclusion, the plume of River Paraíba do Sul is mainly dominated by inorganic suspended particles and chlorophyll-*a*.

Palavras-chave: Paraíba do Sul river plume, ocean color remote sensing, maxver, linear spectral unmixing, pluma do Rio Paraíba do Sul, sensoriamento remoto da cor do oceano, máxima verossimilhança, modelo linear de mistura.

1. Introdução

As plumas dos rios são responsáveis por despejar material orgânico e inorgânico na região costeira adjacente. Essa descarga de materiais varia de acordo com a interação de diversos fatores ambientais que coexistem e atuam em diferentes escalas temporais e espaciais, tais como o vento, precipitação, variações sazonais na vazão do rio, entre outros.

A diversidade de escalas temporais e espaciais dos principais processos atuantes, aliada à extensa dimensão geográfica da plataforma continental brasileira, limita de certa forma, a capacidade de se realizar rotineiramente o monitoramento e a caracterização das plumas de rios e regiões costeiras somente com dados *in situ*.

Tais fatores limitantes são minimizados com o uso do sensoriamento remoto que representa uma ferramenta de aquisição de dados sinópticos com alta repetitividade temporal e boa relação custo-benefício.

Diversos estudos demonstraram que o material orgânico dissolvido e inorgânico em suspensão na água apresentam respostas espectrais distintas. Este comportamento espectral torna possível a aquisição de informações úteis por sensores remotos orbitais de feições e massas de água caracterizadas por concentrações relativamente mais altas destes componentes opticamente ativos (Prieur e Sathyendranath, 1981; Curran e Novo, 1988; Warrick et al., 2004; Thomas e Weatherbee, 2006).

O uso de imagens de satélite multitemporais no estudo de plumas de rios, também pode indicar mudanças no regime de descarga de materiais. Rudorff, et al. (2011) classificou uma série temporal de imagens Landsat 5 TM da pluma do Rio Paraíba do Sul (RPS) que apontou uma diminuição do fluxo de água assim como redução da produção costeira de fitoplâncton e descarga de sedimentos.

O presente trabalho tem por objetivo utilizar imagens do Resourcesat-1/LISS-III para caracterizar os constituintes opticamente ativos da pluma do RPS a partir de técnicas de sensoriamento remoto. Até onde vai o nosso conhecimento, esta é a primeira tentativa de utilização desses dados neste tipo de aplicação no Brasil.

2. Metodologia de Trabalho

A bacia do Rio Paraíba do Sul está situada entre as latitudes 20°26'S e 23°39'S e as longitudes de 41°00'W e 46°30'W. O RPS é considerado um rio de médio porte com 1.145 km de extensão (Ekau e Knoppers, 1999; Salomão et al., 2001). É utilizado para fins domésticos e industriais, não somente como fonte de abastecimento, mas também, como receptor de efluentes (Marengo e Alves, 2005).

O regime hidrológico da bacia do RPS possui uma dinâmica de variação sazonal, que segue o padrão de chuvas da região. A vazão mais baixa ocorre durante a estação de seca, no inverno austral (junho-setembro) e atinge um mínimo de 180 m³/s próximo à foz do rio. A vazão mais alta ocorre durante o período chuvoso no verão (novembro a março) e pode atingir um máximo de 4400 m³/s, também na sua foz (Souza et al., 2010).

O sensor multiespectral LISS-III da plataforma Resourcesat-1 (IRS-P6), faz parte do Programa Espacial Indiano. Possui três bandas que operam na faixa espectral do visível e infravermelho próximo e uma na região do infravermelho médio (IVM). Sua resolução espacial é de 23,5 m (NRSA, 2004). As imagens LISS-III foram utilizadas neste trabalho por ser este um sensor com características próximas ao Landsat TM 5 que teve suas atividades encerradas no começo de 2012. As comparações entre o sensor LISS-III e o Landsat TM 5 são observadas na Tabela 1. O LISS-III foi projetado para dar continuidade ao uso de sensoriamento remoto no gerenciamento do uso da água, terra, agricultura e aplicações correlacionadas (NRSA, 2004).

Tabela 1. Comparação entre as bandas e resolução espacial dos sensores IRS-P6/LISS-III e Landsat 5/TM.

Sensor	Resolução espacial			
	B2 (µm)	B3 (µm)	B4 (µm)	(m)
TM 5	0,52-0,60	0,63-0,69	0,76-0,90	30
LISS-III	0,52-0,59	0,62-0,68	0,77-0,86	23,5

Foram obtidas quatro imagens LISS-III disponíveis no banco de imagens online da DGI/INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>). As imagens selecionadas foram adquiridas em 2010, nos meses de março, julho e agosto (Tabela 2). A imagem de 10/03/2010 é representativa da estação chuvosa na região sudeste brasileira. As demais, são associadas à estação seca.

Tabela 2. Imagens LISS-III selecionadas no banco de imagens online da DGI/INPE

Imagens LISS-III	Estação
10/3/2010	chuvosa
8/7/2010	seca
1/8/2010	seca
25/8/2010	seca

As imagens foram registradas com base em uma imagem TM/Landsat 5, obtida na plataforma GeoCover, do *United States Geological Survey* (USGS). A área de interesse foi definida no quadrante 21°09'S-21°50'S e 40°43'W-41°10'W (Figura 1). Para realizar o registro foram escolhidos 30 pontos de controle para cada imagem e foi utilizada a técnica de

interpolação do vizinho mais próximo. Para cada imagem a raiz quadrada do erro médio foi de ~0,30. Esse método foi escolhido de modo a preservar os valores digitais originais da imagem.

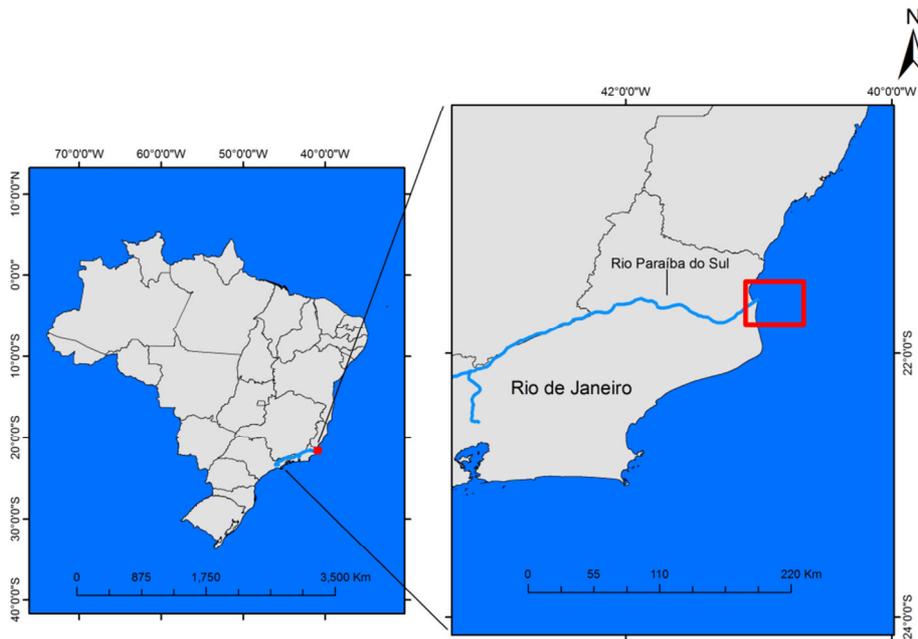


Figura 1. Área de estudo localizada próxima à foz do Rio Paraíba do Sul, costa sudeste brasileira. Área definida no quadrante 21°09'S-21°50'S e 40°43'W-41°10'W.

2.1 Processamento digital de imagens

Cada banda foi calibrada convertendo os números digitais para valores de radiância (Equação 1) e posteriormente, para reflectância no topo da atmosfera (TOA) (Equação 2). Os parâmetros utilizados para a calibração radiométrica foram: os valores mínimos ($Lmin$) e máximos ($Lmax$) de radiância para cada banda, o ângulo de elevação do sol (θ_s) e a distância solar em unidades astronômicas (d). Os valores referentes à distância Terra-Sol, $ESUN_\lambda$, $Lmin_\lambda$ e $Lmax_\lambda$ foram obtidas em Chander et al. (2009) e Sheela et al.(2011), como na Tabela 3.

$$L_\lambda = \left(\frac{Lmax_\lambda - Lmin_\lambda}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{min}) + Lmin_\lambda \quad (1)$$

Onde:

L_λ = Radiância espectral que chega ao sensor orbital [$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$]

Q_{cal} = Valor quantizado do pixel calibrado (número digital – ND)

Q_{calmin} = Mínimo valor quantizado do pixel calibrado correspondente à $Lmin_\lambda$ (ND)

Q_{calmax} = Máximo valor quantizado do pixel calibrado correspondente à $Lmax_\lambda$ (ND)

$Lmin_\lambda$ = Radiância espectral que chega ao sensor escalada de acordo com o Q_{calmin} [$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$]

$Lmax_\lambda$ = Radiância espectral que chega ao sensor escalada de acordo com o Q_{calmax} [$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$]

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s} \quad (2)$$

Onde:

ρ_λ = Reflectância planetária TOA (adimensional)

π = Constante matemática de valor ~3,14159

d = Distância Terra-Sol (unidades astronômicas)

$ESUN_\lambda$ = Média da irradiância solar exoatmosférica

θ_s = ângulo solar zenital (em graus).

Tabela 3. Características radiométricas das bandas do LISS-III do IRS-P6 (Sheela et al., 2011).

Banda	L_{min}	L_{max}	D_{max}	L_{max}/D_{max}
2	0	12,06400	255	0,0473098
3	0	15,13100	255	0,0593370
4	0	15,75700	255	0,0617922
5	0	3,39700	255	0,0133216

Para obter os valores de reflectância de superfície das imagens, foi aplicada uma rotina de correção atmosférica utilizando o modelo de transferência radioativa 6S (Vermote et al., 1997). Neste modelo, a visibilidade foi calculada usando pontos de referência localizados no oceano aberto de forma que a reflectância na banda correspondente ao azul (485 nm) não superasse 10%.

Para isso, foram utilizados como dados de entrada, a reflectância da superfície da atmosfera, o tipo de satélite e sensor, além das informações da banda, data, hora e informação geográfica da cena. Os modelos de atmosfera tropical e aerossol marinho foram utilizados como condição ambiental.

Para obter um melhor resultado da análise da água, cada imagem teve o continente mascarado utilizando a banda do infravermelho médio – IVM (1625 nm). Esta banda foi escolhida devido ao comportamento espectral da água, de absorver mais o IVM do que os comprimentos de onda na faixa do visível. Sendo assim, os valores de reflectância do IVM menores que 10% foram classificados inicialmente como água. Posteriormente, foi realizada uma verificação visual e edição matricial.

Também foram aplicadas máscaras nas nuvens e sombras. Para as nuvens, foram construídas máscaras considerando valores de reflectância elevados na banda do IVM. As sombras foram mascaradas ao se analisar os pixels que possuíam baixa reflectância na banda do azul em relação ao pixel vizinhos.

2.2 Máxima Verossimilhança Gaussiana

Posteriormente, cada imagem foi classificada pelo algoritmo de Máxima Verossimilhança Gaussiana (MaxVer). O MaxVer é uma técnica de classificação supervisionada que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos tais como média e variância (Richard, 1993). Como toda classificação supervisionada, são escolhidas áreas de treinamento que irão definir o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe do treinamento.

As classes foram definidas de acordo com Thomas e Weatherbee (2006), Lihan et al. (2008) e inspeção visual das cenas. Estas foram: (i) Água da pluma do rio (na própria desembocadura do rio), (ii) Água de mistura (nas proximidades da pluma), (iii) Água costeira (próximas à costa, mas afastadas da desembocadura do rio Doce) e (iv) Água oceânica (afastadas da costa).

2.3 Modelo Linear de Mistura Espectral

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) assume que o valor de reflectância de cada pixel é uma combinação linear da resposta espectral de distintos constituintes. Cada constituinte é uma fração neste valor e o MLME tem por principal objetivo decompor cada pixel e estimar a abundância proporcional dos constituintes puros chamados de *endmembers*

(Alcântara et al., 2007; Holben e Shimabukuro, 1993). A fórmula do MLME pode ser descrita como a seguir (Equação 3):

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij}x_{ij}) + e_i \quad (3)$$

Onde r_i é a reflectância espectral da banda espectral i de um pixel que possui um ou mais componentes; x_j é a proporção da componente j dentro de um pixel; a_{ij} é a reflectância espectral para a componente j na banda i ; e_i é o erro para cada banda espectral i e n é o número de componentes. Com a seguinte restrição para todas as componentes: $0 \leq x_j \leq 1$.

Os *endmembers* representativos dos tipos de água foram aqui definidos como: (i) Pluma do rio; (ii) Água de Mistura; e (iii) Água oceânica. Estes foram selecionados com o uso da técnica *Minimum Noise Fraction* (MNF) (Kruse et al., 1993) e visualização no espaço de atributos e nas imagens.

3. Resultados e Discussão

3.1 MLME

A média dos *endmembers* escolhidos para o MLME (Figura 2) evidenciam que na pluma há maior concentração de sedimento em suspensão demonstrada pela alta reflectância na banda do infravermelho próximo (B4: 0,77-0,86 μm). Já na água de mistura, que se encontra próximo à costa há presença de fitoplâncton, onde a curva apresenta maiores valores na banda do verde (B2: 0,52-0,59). Essa dominância de sedimento inorgânico em suspensão seguida por presença de fitoplâncton na água de mistura também foi verificada por Rudorff et al. (2011) utilizando imagens do Landsat 5 TM. As águas oceânicas possuem reflectâncias relativamente baixas em todas as bandas, se comparadas a alvos tipicamente continentais (IOCCG, 2000).

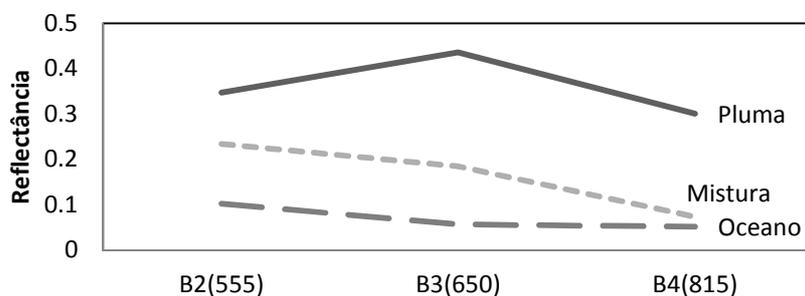


Figura 2. Média dos *endmembers* escolhidos dos dias 10/03/2010 e 25/08/2010 para o modelo linear de mistura espectral.

As imagens de maior e menor vazão do RPS, assim como as frações geradas pelo MLME e respectivos erros médios quadráticos aparecem na Figura 3.

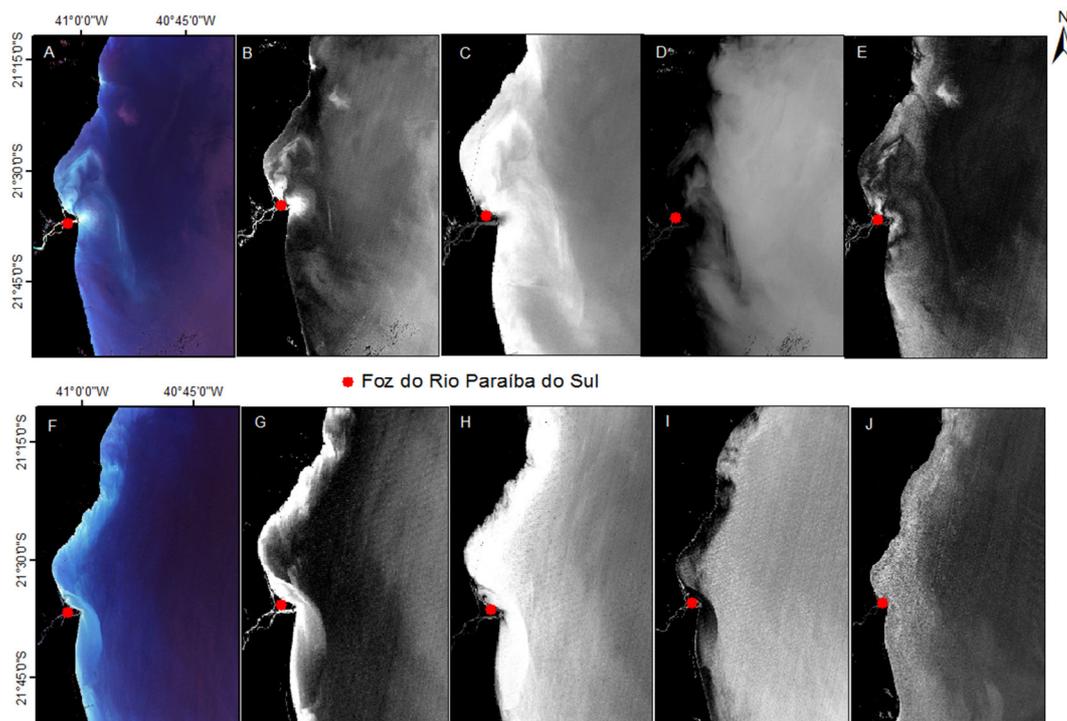


Figura 3. A) Imagem LISS-III (10/03/2010) época de maior vazão do RPS; B) fração pluma; C) fração água de mistura; D) fração oceano; E) erro médio quadrático; F) imagem (25/08/2010) época de menor vazão do RPS; G) fração pluma; H) fração água de mistura; I) fração oceano; J) erro médio quadrático (EMQ).

As áreas mais claras das frações (Figura 3) representam a abundância do *endmember* avaliado e como podem ser observadas, as frações apresentaram um delineamento nítido da classe analisada. Apesar das frações mapeadas possuírem valores abaixo de zero e superior a 1, no geral os três tipos de água apresentaram bom ajuste do modelo sendo que a fração *Água de Mistura* obteve o pior resultado, devido a dificuldade de extrair pixels puros representativos.

3.2 MaxVer

Todas as classes foram bem separadas durante a classificação, de acordo com a distância de Jeffries-Matsushita, com valores entre 1,82-2,00. As classes que tiveram menor grau de separabilidade foram a *Água Costeira* e *Água de Mistura*, seguida por *Pluma* e *Água de Mistura*. A melhor separação foi entre as classes *Pluma* e *Água Oceânica*, assim como, entre *Água Oceânica* e *Água de Mistura* (Figura 4). Rudorff et al. (2011) obtiveram resultados semelhantes com a classificação MaxVer de imagens Landsat TM 5, onde a melhor separação entre as classes foi a de *Pluma* e *Água Oceânica*.

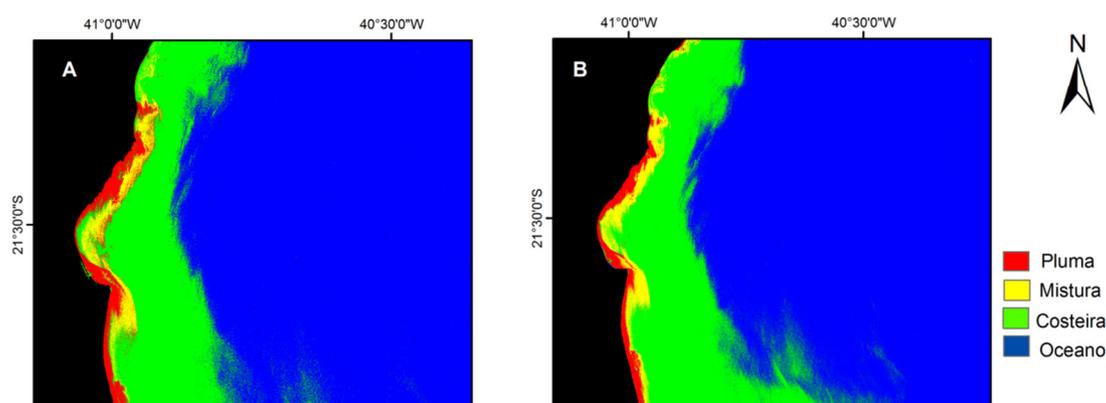


Figura 4. A) Classificação MaxVer da época chuvosa (10/03/2010) e; B) Classificação MaxVer da época seca (25/08/2010) da região costeira adjacente a foz do Rio Paraíba do Sul.

O tamanho das áreas (km^2) das classes *Pluma*, *Água de Mistura* e *Água Costeira*, variou independentemente da época de chuva ou seca (Tabela 4). Este comportamento pode ser explicado pela presença de barragens e reservatórios ao longo dos rios Paraitinga e Paraibuna, principais tributários cuja união forma o RPS e atuam em sua vazão.

Tabela 4. Área (km^2) das classes *Pluma*, *Água de Mistura* e *Água Costeira* obtidas da classificação digital das imagens LISS-III, em período chuvoso (novembro-abril) e seco (maio-outubro).

	Rio Paraíba do Sul	
	10/03/2010	25/08/2010
Área <i>Pluma</i> (km^2)	307,6	466,2
Área <i>Água de Mistura</i> (km^2)	210,2	320,2
Área <i>Água Costeiras</i> (km^2)	3792	4025,2

4. Conclusões

A classificação digital de imagens LISS-III pelo método MaxVer permitiu identificar massas de água opticamente diferenciáveis na região adjacente a foz do RPS. A análise das reflectâncias derivadas dessas imagens de satélite pelo método de MLME nas diferentes bandas possibilitou descrever qualitativamente a distribuição espacial dos constituintes opticamente ativos presentes na área e períodos de estudo. Ao analisar os espectros de reflectância, conclui-se que os constituintes dominantes da pluma do RPS foram os sedimentos em suspensão e o fitoplâncton.

A continuidade de aquisição de imagens do sensor LISS-III é promissora na medida em que permita gerar series temporais da pluma do RPS. Desta forma, espera-se poder desenvolver estudos de caracterização espaço-temporal da dinâmica desta pluma, bem como, relações de causa e efeito associadas a forçantes ambientais.

Para dar continuidade a análise por sensoriamento remoto da dinâmica espacial e temporal da pluma do RPS, recomenda-se o uso de dados de vento, correntes marítimas, chuvas assim como informações de reservatórios e represas ao longo dos rios que possam influenciar em sua vazão e dispersão da pluma.

Referências Bibliográficas

- Alcântara, E.H. **Análise da turbidez na planície de inundação de Curuaí (PA, BRASIL) integrando dados telemétricos e imagens MODIS/TERRA**. 2007. 220p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- Chander, G.; Markham, B.L.; Helder, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environmet**, v.113,p. 893-903, 2009.
- Curran, P.J.; Novo, E.M.L.M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. **Journal of Coastal Resources**, v.4, p. 351-368, 1988.
- Ekau, W., Knoppers, B. An introduction to the pelagic system of the North-East and East Brazilian shelf. **Arch. Fish. Mar. Res.**, v. 47, n. 2/3, p.113-132, 1999.
- Holben, B. N.; Shimabukuro, Y. E. Linear mixing model applied to coarse spatial resolution data from multispectral satellite sensors. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 11, p. 2231-2240, 1993.
- IOCCG, 2000. **Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters**. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, no. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., Goetz, A. F. H. The spectral Image- Processing System (Sips) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sens. Environ**, v. 44, n. 2-3, p.145-163, 1993.
- Lihan T., Saitoh S., Iida T., Hirawake T., Iida K. 2008. Satellite-measured temporal and spatial variability of the Tokachi River plume. Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, v. 78, p. 237-249, 2008.
- Marengo, J.A.; Alves, L.M. Tendências hidrológicas da bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n.2, p. 215-226, 2005.
- NRSA – National Remote Sensing Agency, India. 2004. **Resourcesat-1 Data User's Handbook**. 137p.
- Prieur, L., Sathyendranath, S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. **Limnology and Oceanography**,v. 26, p. 671-689, 1981.
- Richard, A. J. **Remote sensing digital image analysis**. New York: Springer-Verlag, 1993. p. 340.
- Salomão, M.S.M.B.; Molisani, M.M.; Ovalle, A.R.C.; Rezende, C.E.; Lacerda, L.D.; Carvalho, C.E.V. Particulate heavy metals transport in the lower Paraíba do Sul river basin, southeastern Brazil. **Hydrol. Process.**, v. 15, p. 587-593, 2001.
- Rudorff, N.M.; Milton, K.; Rezende, C.E. Spectral mapping of the Paraíba do Sul River plume (Brazil) using multitemporal Landsat images. **Journal of Applied Remote Sensing**, v.5, n.1, p. 1-19, 2011.
- Sheela, A.M.; Letha, J.; Joseph, S.; Ramachandran, K.K.; Sanalkumar, S.P. Trophic state index of a lake system using IRS (P6-LISS III) satellite imagery. **Environ. Monit. Assess.**, v. 177, p. 575-592, 2011.
- Souza, T. A. M. Godoy, J., Godoy, M. L. D., Moreira, P I., Carvalho, Z. L., Salomão, M. S., Rezende, C. E., Use of multitracers for the study of water mixing in the Paraíba do Sul River estuary. **J. Environ. Radioact.** v. 101, p. 564-570, 2010.
- Thomas, A.C. and R. A. Weatherbee. Satellite-measured temporal variability of the Columbia River plume. **Remote Sensing and the Environment.**, v. 100, p.167-178, 2006.
- Vermote, E. F., Tanre, D., Deuzé, J. L., Herman, M., Morcrette, J. J. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.
- Warrick JA, Fong DA. Dispersal scaling from the world's rivers. **Geophysical Research Letters**. v. 34,2004.