

Correlação de dados de reflectância de sensoriamento remoto estimados com dados do sensor MODIS e medidas in situ

Aline de Matos Valerio¹
Milton Kampel¹
José Luis Stech¹

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

Abstract. The parameter of remote sensing reflectance (R_{rs}) provides quantitative and qualitative information of optically active components (OACs) in the studied water body. This parameter establishes a relationship between the images generated by sensors aboard of satellites and the in situ OACs. Among the multispectral sensors, the MODIS sensor on the Aqua platform is the most appropriate, specially the product of surface reflectance. Therefore, the objective of this research was to use measures of R_{rs} obtained in situ and by the product MYD09 to acquire information about the OACs present in the Manso Reservoir, Mato Grosso, Brazil. To perform this study it was made an linear spectral mixing model (LSMM) on the image composition of the product MYD09, referring to the days of in situ collection of reflectance spectrum. It were generated polynomial regressions with the values of R_{rs} obtained by satellite and in situ as well as measurements of concentration of chlorophyll-a (chl-a). The results showed that with the use of the LSMM on the composition of MYD09 it was possible to classify the water of the reservoir. Also showed that the in situ R_{rs} simulated to the MODIS bands agree reasonably well with those obtained by the MYD09. It was also observed that the MYD09 near infrared band with a resolution of 250 showed good results to observe the presence of chl-a in the Manso Reservoir.

Palavras-chave: reflectância de sensoriamento remoto, reservatório de Manso, MODIS Aqua, remote sensing reflectance, reservoir.

1. Introdução

Ao realizar medidas de campo em estudos sobre a cor da água, a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) é um parâmetro que deve ser medido, pois fornece informações quantitativas e qualitativas dos componentes opticamente ativos (COAs) significantes no corpo de água estudado. Este parâmetro estabelece uma relação importante entre as imagens geradas pelos sensores de satélites e as concentrações *in situ* de COAs (Lee et al, 1997; Toole et al., 2000).

Vários modelos de cor da água foram desenvolvidos para estimar as concentrações de constituintes a partir de algoritmos empíricos que utilizam medições de R_{rs} . Como estes modelos evoluem continuamente, seu sucesso depende das medidas da R_{rs} realizadas em campo.

Além disso, as calibrações das radiâncias medidas por sensores a bordo de satélites também dependem da precisão da R_{rs} determinada em campo.

Com o R_{rs} é possível simular bandas de sensores multiespectrais tal como MODIS. Entre os produtos do MODIS, o produto de reflectância da superfície terrestre tem sido indicado para estudos dos sistemas aquáticos continentais. Este produto possui sete bandas distribuídas na região do visível e infravermelho (0,648 μm ; 0,858 μm ; 0,470 μm ; 0,555 μm ; 1,240 μm ; 1,640 μm ; 2,130 μm). Quando pertencente ao sensor MODIS Terra chama-se MOD09 e quando pertencente ao sensor MODIS Aqua chama-se MYD09 (Rudorff et al., 2007).

O objetivo deste trabalho é utilizar medidas de R_{rs} obtidas in situ e pelo produto MYD09 para adquirir informações sobre os COAs presentes no corpo de água.

2. Metodologia de Trabalho

O Reservatório de Manso localiza-se no Estado de Mato Grosso, entre as seguintes coordenadas: 14°14' - 15°20'S e 55°20' - 60°00'W (Figura 1).

O reservatório possui uma área inundada de 427 km², volume de 7,3 km³ e a profundidade próxima da barragem é de 60m aproximadamente. O reservatório foi criado entre novembro de 1999 e fevereiro de 2000. O clima tropical da área possui duas épocas distintas: seca (abril-agosto) e chuvosa (setembro-março).

A área inundada é principalmente formada por arbustos, embora algumas regiões apresentem mata ciliar. As árvores não foram retiradas antes do enchimento do reservatório e agora, estão se decompondo lentamente (Hylander et al., 2006).

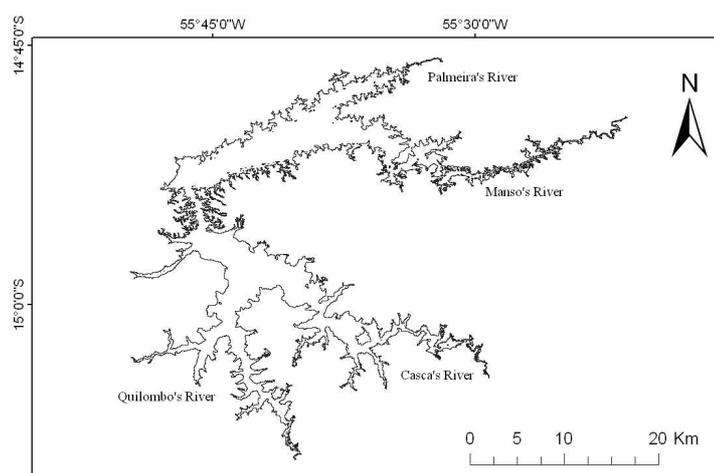


Figura 1. Área de estudo, reservatório de Manso, MT, Brasil.

Com o objetivo de se obter medidas de R_{rs} , foi realizada uma campanha de campo para a coleta de dados de radiometria *in situ* durante o período do dia 29 de fevereiro ao dia 02 de março de 2008. Antes de realizar as medidas radiométricas *in situ*, as placas de referência de campo e de laboratório foram calibradas para gerar o fator de correção (K) para as medidas realizadas posteriormente em campo. As medidas radiométricas realizadas seguiram o protocolo de aquisição sugerido por Fougnie et al. (1999).

Os dados radiométricos coletados com radiômetros hiper-espectrais foram utilizados como verdade de campo para comparar com as imagens do sensor MODIS. Para realizar as medições radiométricas foi utilizado o radiômetro hiperespectral FieldSpec Hand Held. O FieldSpec Hand Held apresenta campo de visada entre 5° e 15°, resolução espectral de 3nm e intervalo espectral de 350 a 1100 nm.

Ao todo foram realizadas 16 coletas. Também foram coletadas amostras de água na superfície para a determinação da concentração de clorofila, através da técnica de espectrofotometria como descrito em Marker e Jinks (1982) para 10 pontos. Estas medidas *in situ* foram realizadas em colaboração com a Universidade de Juiz de Fora.

Os dados hiper-espectrais foram integrados para simular os valores das bandas do sensor multi-espectral MODIS, de acordo com a técnica de integração de retângulos descrita em Kampel et al. (2009). Desta forma a comparação entre os dados hiper-espectrais e multiespectrais se torna viável. A partir do fator de correção f_c , a medida radiométrica da placa utilizada em campo foi corrigida. Deste modo foi possível calcular a R_{rs} de acordo com Mobley (1999) através da Equação 1:

$$R_{rs} = \frac{L_w(0+)}{E_d(0+)} = \frac{L_u(0+) - \rho L_{sky}(0+)}{E_d(0+)} \quad (1)$$

onde: $L_w(0+)$ é a radiância emergente da água; $E_d(0+)$ é a irradiância espectral incidente na superfície do corpo de água; L_u é a radiância ascendente que chega ao sensor; $\rho L_{sky}(0+)$

representa a radiação proveniente do céu (*skylight*) na interface ar-água, e depende do azimute, geometria de aquisição de dado, velocidade do vento e rugosidade da superfície. Neste trabalho foi assumido para ρ o valor de 0,028, de acordo com Mobley (1999). L_{sky} é a radiância difusa proveniente do céu e que não possui informação sobre a água.

$E_d(\lambda)$ foi calculado através da medida de radiância $L(\lambda)$, de uma placa branca *Spectralon* (Mobley, 1999). Assim, $E_d(\lambda)$ é dada pela seguinte Equação 2:

$$E_d(\lambda) = L(\lambda) \cdot f_c \cdot \pi \quad (2)$$

onde: f_c é um fator de correção calculado em laboratório pela razão entre $L(\lambda)$ de uma placa de referência padrão e $L(\lambda)$ da placa *Spectralon* utilizada em campo (Kampel et al., 2009).

Para complementar as informações sobre a qualidade da água do reservatório de Manso, foram utilizados outros 17 dados de concentração de clorofila-a (*chl-a*), coletados em superfície pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) durante os períodos de 22/03/2004 a 25/03/2004 e 19/07/2004 a 22/07/2004.

Para o presente estudo foram adquiridas imagens do produto MYD09 derivado do sensor MODIS Aqua com resolução espacial de 500m e 250m. A escolha do sensor MODIS Aqua atende as recomendações de pesquisadores que advertem que as imagens Aqua são mais bem calibradas e possuem menos ruídos em relação ao MODIS Terra (Shutler et al., 2007). Deste modo, as imagens do MODIS Aqua são preferidas no estudo da cor da água e algoritmos desenvolvidos para estimar a concentração de clorofila, turbidez e outras formas de monitoramento estuarino e costeiro (Franz et al., 2007).

As imagens obtidas são referentes às datas das campanhas realizadas no início de março de 2008 e pretéritas. As imagens do produto MYD09 correspondente ao *tile* H12 V10 foram obtidas a partir do portal *EOS Gateway do Goddard Space Flight Center*, NASA.

As imagens do produto MYD09 foram convertidas do formato *HDF* para o formato *Geotiff* e, quando de 500m, foram reamostradas para 250m através do aplicativo MODIS Conversion Toolkit. O produto MYD09 já se encontrava georreferenciado, permitindo assim que as amostras em campo se sobreponham à imagem com um erro geométrico mínimo.

Para evitar problemas de mistura espectral devido à resolução espacial do MODIS, que permite que um elemento de cena (correspondente a um pixel da imagem) inclua dentro de seu limite mais de um tipo de cobertura do terreno, foi aplicado o modelo linear de mistura espectral (MLME). Sendo assim, o MLME considera o valor do pixel em qualquer banda espectral como a combinação linear da resposta de cada componente dentro do pixel.

Para realizar o MLME foram selecionados *end-members* após realizar os processamentos supracitados no produto MYD09. A seleção dos *end-members* foi realizada com a identificação de *pixels* puros, ou seja, os *pixels* mais representativos da resposta espectral dos constituintes escolhidos que foram fitoplâncton, matéria orgânica dissolvida e material inorgânico em suspensão (Holben e Shimabukuro, 1993). Deste modo, através do MLME tem-se como objetivo explicar a variação espacial da composição do corpo de água.

A fórmula do modelo linear de mistura pode ser escrita como (Equação 3):

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

onde ri 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: $0 \leq x_j \leq 1$.

A reflectância da superfície gerada pelo produto MYD09 é definida como a parte da radiação solar refletida pela superfície da terra após a correção atmosférica e geométrica (Vermote e Vermeulen, 1999). Já a R_{rs} é obtida pela razão da radiância ascendente L_{uw} (ν , φ , z) pela irradiância descendente E_d (z) onde ν é o ângulo zenital, φ é o azimute, e z é o eixo vertical ascendente das coordenadas.

Deste modo, com a intenção de transformar a reflectância de superfície em reflectância de sensoriamento remoto, Bryan Franz (2008 – comunicação pessoal) sugere dividir por π para que o resultado possa ser obtido.

Devido à baixa resolução espacial, algumas amostras caíram dentro do mesmo pixel e sendo assim, das 13 amostras *in situ* de radiância medida pelo Fieldspec, apenas 10 foram selecionadas mostrando um valor único de cada pixel. Para cada ponto foi extraído o valor de reflectância de superfície utilizando o aplicativo RSI ENVI 4.4. Os dados de R_{rs} medidos em campo foram simulados para as bandas do MYD09 e com estes valores foi realizada uma regressão linear para verificar se a operação sugerida era válida para este estudo.

Utilizando os dados de chl-*a* coletados em campanhas pretéritas e de 2008 e os valores de R_{rs} extraídos, para os pontos de coleta, das imagens MYD09 para estes mesmos dias foi realizada um regressão polinomial. Esta teve por objetivo obter um algoritmo específico que pudesse estimar a chl-*a* para este reservatório, de modo a desenvolver um método eficiente de monitoramento da qualidade da água.

3. Resultados e Discussão

A seleção dos pixels de referência foi realizada na composição de imagens do produto MYD09 com o objetivo de escolher os pixels que melhor expressassem a composição óptica da água do reservatório levando em consideração a presença de clorofila, matéria orgânica e sedimento em suspensão (Figura 2).

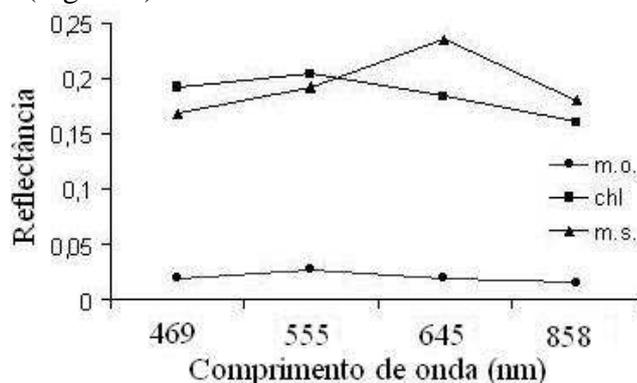


Figura 2 - Pixels de referência selecionados na imagem para rodar o MLME para a composição das imagens MYD09

O resultado da aplicação do MLME na composição para os dias 02, 03 e 05 de março de 2008 pode ser observado na Figura 3. Nota-se que a maior concentração de clorofila foi encontrada nas extremidades do reservatório, além do corpo de baixo, nos rios Casca e Quilombo. Já a matéria orgânica apresenta maior quantidade no corpo do reservatório do rio Manso, além da extremidade do rio Casca. O sedimento em suspensão encontrou-se em maior concentração nas extremidades do reservatório e em maior quantidade no rio Quilombo. Na Figura 3(d) a composição colorida RGB (chl-m.o.-m.s.) permite uma melhor visualização dos COAs dominantes no reservatório.

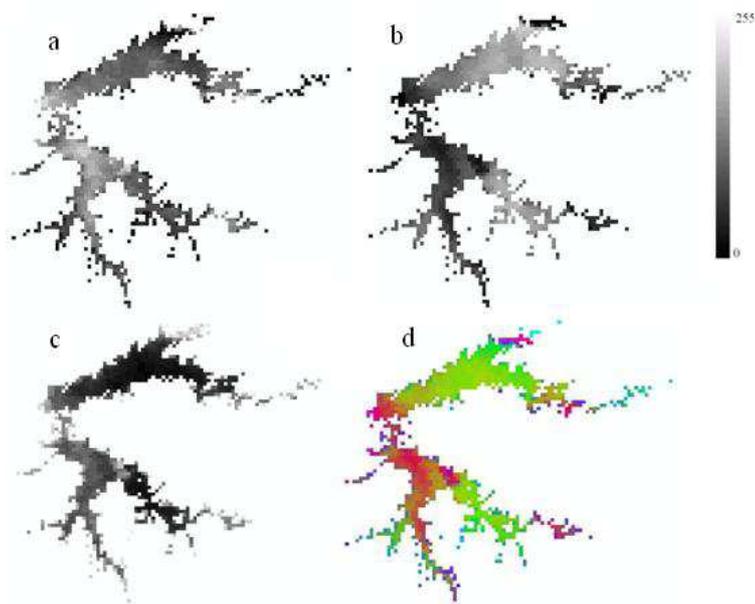


Figura 3 - Imagens fração e composição colorida. (a) concentração de clorofila-*a*, (b) matéria orgânica, (c) material em suspensão, (d) composição colorida R(a)G(b)B(c) para o reservatório de Manso, MT.

Com objetivo de verificar se a resposta de reflectância de sensoriamento remoto obtida pelo sensor MODIS era compatível com as medidas realizadas *in situ*, foi gerado um modelo de regressão linear para estas duas variáveis (Figura 4).

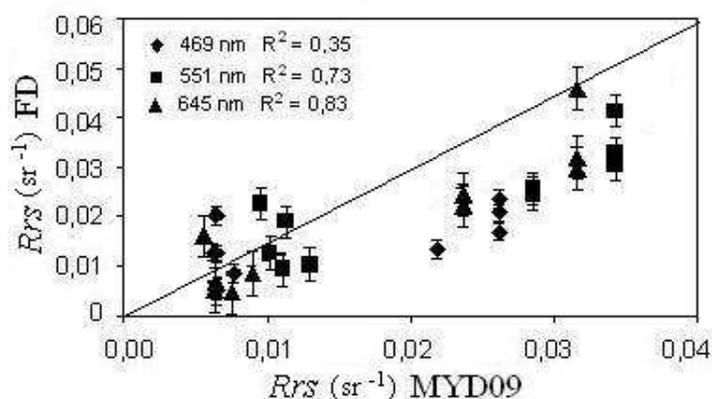


Figura 4 - Regressão linear entre os espectros de R_{rs} simulados para as bandas do MODIS e a R_{rs} obtida no MYD09.

Para um intervalo de confiança de 95%, a regressão linear da banda do verde obteve um resultado significativo com R^2 igual a 0,73 (RMSE=0,005; $n=10$; $p<0,05$). A regressão linear para a banda do vermelho também obteve um resultado significativo com R^2 igual a 0,83 (RMSE=0,006; $n=10$; $p<0,05$). Já para a banda do azul, a regressão linear obteve um R^2 baixo ($R^2=0,35$; RMSE=0,004; $n=10$; $p>0,05$). Percebe-se que quanto maior o comprimento de onda, maior o R^2 . Apesar da correção atmosférica do produto MYD09, nota-se que a regressão linear da banda do azul não foi significativa. Este resultado pode ser justificado pelo fato de que menores comprimentos de onda sofrem mais espalhamento (Mobley, 2004).

A resolução espacial de 500m do MOD09 resulta na heterogeneidade do pixel, ou seja, este é formado pela integração da resposta de diferentes alvos. Sendo assim, pôde ser constatado que houve boa concordância entre as estimativas de R_{rs} orbitais com as *in situ*.

Deste modo, o resultado obtido pela regressão mostra que para o reservatório de Manso é possível utilizar o produto MYD09 para se trabalhar com R_{rs} .

Ao todo foram obtidos 27 dados de chl-*a* medidos nas campanhas citadas anteriormente, que variam de 10 $\mu\text{g/L}$ a 1170 $\mu\text{g/L}$ e com média de 460 $\mu\text{g/L}$. Nos valores de chl-*a* foi utilizado um logaritmo de base dez. Com as imagens MYD09 de resolução espacial de 250m, dos mesmos dias das campanhas, foram extraídos os valores de R_{rs} da banda do infravermelho próximo (IFVP) centrada em 856 nm para os mesmos pontos da coleta de chl-*a* realizados. Com estes dados foi gerada uma regressão polinomial que gerou um polinômio de quarta ordem, com R^2 de 0,69 (RMSE= 0,34; $n=27$; $p<0,05$) (Figura 5).

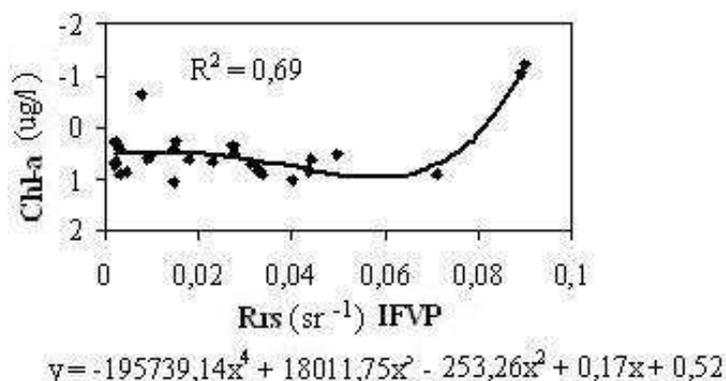


Figura 5 - Regressão Polinomial da concentração de clorofila-*a* e a R_{rs} da banda do infravermelho próximo (IFVP) do sensor MODIS de resolução espacial de 250m

O seguinte modelo foi gerado para estimar a chl-*a* por meio da MYD09 no reservatório de Manso:

$$\log_{10}(\text{chl-}a) = -195739,14x^4 + 18011,75x^3 - 253,26x^2 + 0,17x + 0,52$$

A regressão possui dois pontos com alta R_{rs} no IFVP ($R_{rs} \sim 0,089$), estes pontos se referem aos pontos 16 e 17 da coleta de março de 2008. Os pontos 16 e 17 se encontram na parte mais interna do reservatório, onde há baixa chl-*a* e maior presença de matéria orgânica dissolvida, que pode ser causada entre outros fatores, devido às árvores submersas em decomposição. O aumento da MOD na água aumenta a reflectância em comprimento de ondas maiores, como o infravermelho próximo, o que pode ser observado por satélite (Kutser et al., 2005).

Também se observa a presença de um *outlier* na regressão, que ao ser retirado, o R^2 é igual a 0,83 (RMSE=0,24; $n=26$; $p<0,05$) e o modelo para estimar a chl-*a*:

$$\log_{10}(\text{chl-}a) = -322214,94x^4 + 40700,04x^3 - 1501,06x^2 + 20,43x + 0,54$$

Tarrant e Neuer (2009) realizaram um experimento semelhante ao estudar dois reservatórios nos Estados Unidos utilizando amostras de chl-*a* ao longo de um ano e imagens MOD09 com resolução espacial de 250m para os mesmos dias das coletas. Eles obtiveram um polinômio de quarta ordem com o R^2 de 0,87 para um reservatório e 0,69 para o outro. Deste modo, o sensor MODIS com a resolução espacial de 250m demonstra poder ser utilizado para monitorar a qualidade da água de reservatórios sendo capaz de criar modelos que possam prever a chl-*a*.

4. Conclusões

O produto MYD09 mostrou-se eficiente para classificar a água do reservatório, corroborando com as análises dos dados obtidos a partir de dados *in situ*. Com o MLME foi possível observar que as maiores quantidades de chl-*a* e sedimento em suspensão foram

observadas nos braços dos rios. Já a matéria orgânica foi observada em maior concentração no corpo principal do reservatório.

As R_{rs} obtidas in situ por meio do FieldSpec e simuladas para as bandas do MODIS concordaram razoavelmente bem com às obtidas pelo produto MYD09, com exceção para a banda do azul, que devido ao menor comprimento de onda, é mais afetada pelo espalhamento atmosférico.

A banda do infravermelho próximo fornecida pelo produto MYD09 com resolução de 250m pode ser empregada para monitorar a chl-a em reservatórios a partir de modelos empíricos de regressão polinomial.

Referências Bibliográficas

Albert, A.; Mobley, C.D. An analytical model for subsurface irradiance and remote sensing reflectance in deep and shallow case-2 waters. **Optics Express**. v. 11, n. 22., p. 2873-2890, 2003.

Fougnie, B.; Frouin, R.; Lecomte, P.; Deschamps, P.-Y. Reduction of Skylight Reflection Effects in the Above-Water Measurement of Diffuse Marine Reflectance. **Applied Optics**. v. 38, n.18, p. 3844-3856, 1999.

Franz, B.A.; Kwiatkowska, E.J.; Meister, G.; McClain, C.R. Utility of MODIS-Terra for Ocean Color Applications. **SPIE**, v. 6677, 2007.

Gitelson, A.A.; Dall'olmo, G.; Moses, W.; Rundquist, D.C.; Tadd Barrow; Fisher, T.R.; Gurlin, D.; Holz, J. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-*a* in turbid waters: Validation. **Remote Sensing of Environment**. v. 112, p. 3582-3593, 2008.

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.

Hylander, L.D., Gröhn J., Tropp M., Vikström A., Wolpher H., Castro e Silva E., Meilie M., Oliveira L.J. Fish mercury increase in Lago Manso, a new hydroelectric reservoir in tropical Brazil. **Journal of Environmental Management**, v.81, p.155-166, 2006.

Kampel, M.; Lorenzetti, J.A.; Bentz, C.M.; Nunes, R.A.; Paranhos, R.; Rudorff, F.M.; Politano, A.T. Simultaneous measurements of chlorophyll concentration by Lidar, fluorometry, above-water radiometry, and ocean color MODIS images in the Southwestern Atlantic. **Sensors**. v. 9, p. 528-541, 2009.

Kampel, M.; Lorenzetti, J.A. Produtos para oceano - MOCEAN. In: Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. (Org) **O Sensor MODIS e suas aplicações no Brasil**. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2007, cap 3, p. 37-52.

Kampel, M.; Novo, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R.B. (Org) **Oceanografia por Satélites**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, cap. 12, p.180-196.

Kutser, T.; Pierson, D.C.; Kallio, K.Y.; Reinart, A.; Sobek, S. Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**. v. 94, p. 535-540, 2005.

Lee, Z.P.; Carder, K. L.; Steward, R. G.; Peacock, T. G.; Davis, C. O.; Mueller, J.L. Remote-sensing reflectance and inherent optical properties of oceanic waters derived from above-water measurements. **SPIE Proc**. v. 2963, p.160-166, 1997.

Marker, A.F.H.; Jinks, S. The spectrophotometric analysis of chlorophyll *a* and phaeopigments in acetone, ethanol and methanol. **Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol**. v.16, p. 3-17, 1982.

Mobley, C.D. **Light and water** Radiative transfer in natural waters. Academic Press. 2004, 593p.

Mobley, C.D. Estimation of the remote sensing reflectance from above-surface measurements. **Applied Optics**. v. 38, n. 36, p. 7442-7455, 1999.

Olszewski, J; Darecki, M. Derivation of remote sensing reflectance of Baltic waters from above-surface measurements. **Oceanologia**, v.41, n.1, p. 99-111, 1999.

Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. (Org) **O Sensor MODIS e suas aplicações no Brasil**. São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2007. cap 1, p. 1-21.

Rudorff, F. M.; Kampel, M.; Gaeta, S. A.; Pompeu, M.; Lorenzetti, J. A. Comparação de algoritmos empíricos na estimativa da concentração de clorofila-a na região costeira de Ubatuba, litoral norte de São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007b. p. 4675-4682. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.18.02.27>>. Acesso em: 24 jul. 2009.

Shutler, J.D.; Land, P.E.; Smyth, T.J.; Groom, S.B. Extending the MODIS 1km ocean colour atmospheric correction to the MODIS 500 m bands and 500 m chlorophyll-a estimation towards coastal and estuarine monitoring. **Remote Sensing of Environment**. v.107, p. 521-532, 2007.

Tarrant, P.; Neuer S. Monitoring algal blooms in a southwestern U.S. reservoir system. **EOS**, v. 90, n. 5, 38-39, 2009.

Toole, D.A.; Siegel, D.A.; Menzies, D.W.; Neumann, M.J.; Smith, R.C. Remote-sensing reflectance determinations in the coastal ocean environment: impact of instrumental characteristics and environmental variability. **Applied Optics**. v. 39, n. 3, p. 456-469, 2000.

Vermote, E.F.; Vermeulen, A. **MODIS** - algorithm technical background document, atmospheric correction algorithm - spectral reflectances (MOD09). Washington: NASA, v. 4.0, 1999. 107p.

Zhang, B.; LI, J.; Shen, Q.; Chen, D. A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance. **Environ. Monit. Assess**. v. 145, p. 339-347, 2008.