

Análise comparativa de medições *in situ* e orbital de de radiâncias do oceano na estimativa de concentração de clorofila-*a*

Roberto Pinto Souto¹, Milton Kampel³, Frederico Brandini⁴,
Haroldo Fraga de Campos Velho² and Stephan Stephany²

¹ Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – CAP/INPE

² Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada – LAC/INPE

³ Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR/INPE

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Avenida dos Astronautas, 1.758 - 12227-010 - São José dos Campos – SP - Brasil

{roberto,haroldo,stephan}@lac.inpe.br, milton@dsr.inpe.br

⁴ Centro de Estudos do Mar – CEM/UFPR

UFPR - Universidade Federal do Paraná

Av. Beira-mar s/n Caixa Postal 50002 - 83255-000 – Pontal do Paraná – PR – Brasil

brandini@ufpr.br

Abstract. Chlorophyll-*a* concentration values are estimated from *in situ* radiance measurements and ocean color remote sensing data. Both estimations are compared to concentration values obtained from fluorescence measurements. Ocean color data was provided by the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) satellite. The global empirical algorithm OC2v4 was used to estimate the clorofila-*a* concentration from the detected radiance values in multiple wavelengths. *In situ* data includes measurements collected during an oceanographic cruise in the Brazilian Southeast coast in May 2003. A spectroradiometer was used to measure radiances, and a profiling natural fluorometer (PNF), to measure fluorescence. In addition, ocean water samples were collected in order to perform laboratory clorofila-*a* fluorometric analysis. The comparison of *in situ* and remote sensing data was difficult due to the poor number of match-up's, obtained for only three stations. Results show that a further investigation is required in order to evaluate the OC2v4 algorithm for data related to that coast, and possibly propose a regional version.

Palavras-chave: remote sensing, ocean color, radiometry, sensoriamento remoto, cor do oceano, radiometria.

1. Introdução

Este trabalho é resultado da tentativa de se obter dados experimentais de radiância espectral acima da superfície do mar, com o propósito de validar uma nova metodologia de estimação de concentração de clorofila-*a* e de algumas das propriedades óticas inerentes da água, tais como os coeficientes de absorção e de espalhamento (Chalhoub e Campos Velho (2002), Souto et al. (2004)), além da estimativa de fontes de bioluminescência (Chalhoub e Campos Velho (2003)). Sensoriamento remoto da cor do oceano tem sido amplamente utilizado para estimar a concentração de clorofila-*a* na camada superior do mar. Os principais algoritmos operacionais globais são baseados em relações empíricas, razões de bandas e regressões estatísticas com dados *in situ*. Dados *in situ* na região da costa sudeste brasileira, no oceano Atlântico sudoeste são raros, e outros trabalhos (Omachi e Garcia (2000)) já indicaram a necessidade de se desenvolver algoritmos regionais.

O objetivo deste trabalho é comparar medidas *in situ* radiométricas e de concentração de clorofila-*a* com dados obtidos pelo sensor SeaWiFS na costa sudeste brasileira. Na mesma oportunidade foram feitas medições contínuas de clorofila-*a* na zona eufótica com um sensor de

fluorescência natural (PNF). Foram também coletadas amostras de água em diferentes profundidades, para se obter a concentração de clorofila-*a* por técnicas fluorimétricas *in vitro*, a qual foi considerada a concentração de referência para as demais.

A reflectância de sensoriamento remoto R_{rs} vem sendo amplamente utilizada em modelos empíricos de obtenção da concentração de clorofila-*a*, tais como o *Ocean Chlorophyll 2* versão 4 (OC2v4), apresentado por O'Reilly et al. (2000). Este parâmetro é dado pela razão entre a radiância espectral L_w medida logo acima da superfície d'água (em inglês, "water-leaving radiance") nas direções polar θ e azimutal φ , e a irradiância espectral incidente medida logo acima da superfície do mar - $E_d(0^+, \lambda)$ ou $E_s(\lambda)$ - conforme é mostrado na Eq. (1). Portanto, deseja-se que a medição da radiância principalmente, seja o mais precisa possível, a fim de se obter uma estimativa de clorofila-*a* próxima da realidade.

$$R_{rs}(\theta, \varphi, \lambda) = \frac{L_w(\theta, \varphi, \lambda)}{E_s(\lambda)} \quad (1)$$

O sensor SeaWiFS trabalha com a radiância normalizada (nL_w), expressa pela Eq. (2), na qual se anulam os efeitos da variação do ângulo zenital de elevação solar (Gordon e Clark (1981)), onde a grandeza $\bar{F}_0(\lambda)$ é o fluxo solar médio logo acima do topo da atmosfera terrestre (Neckel e Labs (1984)), cujos valores para o sensor SeaWiFS são dados pela Tabela 1, por sua vez extraídos do pacote SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System) versão 4.6, da Nasa/Gsfc (2004).

$$nL_w(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{E_s(\lambda)} \bar{F}_0(\lambda) \quad (2)$$

Tabela 1– Valores do fluxo solar médio logo acima do topo da atmosfera terrestre $\bar{F}_0(\lambda)$.

Centro de Banda (nm)	Radiância (W m ⁻² nm ⁻¹ sr ⁻¹)
412	1,708
443	1,895
490	1,937
510	1,884
555	1,853
670	1,534

FONTE: pacote SeaDAS (Nasa/Gsfc (1994)), versão 4.6.

A grandeza obtida através das medições de radiância no campo, com o propósito de comparar com a reflectância de sensoriamento remoto R_{rs} , foi o fator de reflectância bidirecional espectral, que é equivalente à R_{rs} conforme Steffen (1996). Seu valor é dado pela expressão

$$FR(\theta, \varphi, \lambda) = \frac{L_w(\theta, \varphi, \lambda)}{K_p(\lambda)L_p(\lambda)}, \quad (3)$$

onde L_p é a radiância da placa de referência de sulfato de Bário (BaSO₄) e K_p é o fator de intercalibração da mesma com a placa padrão de laboratório.

A radiância L_w de campo, na realidade é uma parcela da radiância total L_t medida pelo sensor *in situ*, não podendo ser obtida diretamente. A radiância total é ainda composta pela parcela de radiação proveniente da claridade do céu refletida sobre a água, representada por L_{sky} . Deste modo, a equação que expressa a radiância total medida pelo sensor *in situ*, é dada por

$$L_t(\theta, \varphi, \lambda) = L_w(\theta, \varphi, \lambda) + \rho L_{sky}(\theta, \varphi, \lambda), \quad (4)$$

onde ρ é a reflectância da água. Portanto a radiância L_w é representada por

$$L_w(\theta, \varphi, \lambda) = L_t(\theta, \varphi, \lambda) - \rho L_{sky}(\theta, \varphi, \lambda). \quad (5)$$

O valor de ρ varia conforme a geometria de aquisição, da velocidade dos ventos e do ângulo de elevação do sol (ângulo solar zenital). De acordo com Mobley (1999), para ângulos de aquisição polar $\theta_v=40^\circ$ e azimutal $\varphi_v=135^\circ$ tem-se a melhor geometria para medição de radiância, visto que o efeito do reflexo da luz solar é reduzido ao máximo para estes ângulos. Neste caso, tem-se $\rho=0.028$, para ventos não superiores a 5 cm s^{-1} .

2. Materiais e Métodos

No trabalho de campo realizado durante um cruzeiro realizado no outono de 2003, foi utilizado um espectralradiômetro SPECTRON SE-590, com 252 canais, variando de 350 a 1100 nm. A respectiva unidade coletora tem campo de visada (FOV) de 6 graus, na qual foi usado um polarizador para se filtrar reflexos da radiação solar na água.

Dados de radiância de campo L_w , foram obtidos entre 27 de abril a 09 de maio de 2003, a partir de medições com um espectralradiômetro em cruzeiro realizado na costa sudeste do Brasil, de Ubatuba (SP) até Arraial do Cabo (RJ). Foram feitas medições em 3 estações oceanográficas, sendo mostrada aqui a comparação de concentração de clorofila-*a* calculada com dados de radiância normalizada nL_w do sensor SeaWiFS quando “match-up” entre a data de aquisição no campo e de passagem do satélite.

Foram feitas medições de radiância da água (L_t) e do céu (L_{sky}), com ângulo $\theta_v=40^\circ$ com relação à normal da superfície da água, e ângulo azimutal $\varphi_v=90^\circ$. Empregando-se então a Eq. (5), obtém-se o valor da radiância logo acima da superfície (L_w). Imediatamente após as medidas *in situ*, para não perder a mesma condição de iluminação, é feita uma medição de radiância da placa de referência (L_p) de sulfato de Bário (BaSO_4).

Com a radiância hiperespectral original de 252 canais, simula-se a radiância das seis primeiras bandas espectrais do sensor SeaWiFS, cada uma com largura de 20 nm e centros de banda iguais a 412 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 555 nm e 670 nm. Os fatores de reflectância nestas bandas chamaremos de FR412, FR443, FR490, FR510, FR555 e FR 670, correspondendo às bandas espectrais Rrs412, Rrs443, Rrs490, Rrs510, Rrs555 e Rrs670 do SeaWiFS, respectivamente.

A simulação de bandas consiste em integrar as radiâncias espectrais em um intervalo de comprimento de onda determinado, tendo sido utilizada a regra de integração dos retângulos para realizar esta tarefa neste trabalho. Esta regra consiste em aproximar o valor da área sob a curva dos valores de radiância espectral $L(\lambda)$ através de uma soma de retângulos, expressa pela Eq. (6)

$$\int L(\lambda) d\lambda \cong \sum_{k=1}^{N^b} L(\bar{\lambda}_k) (\lambda_k - \lambda_{k-1}) = L^b, \quad (6)$$

onde $\bar{\lambda}_k = (\lambda_k - \lambda_{k-1})/2$, é o ponto médio da base do retângulo com altura $L(\bar{\lambda}_k)$ e largura $(\lambda_k - \lambda_{k-1})$, e N^b é a quantidade de termos a serem somados no intervalo de banda b . De forma análoga, pode-se também realizar uma aproximação com retângulos cuja a altura é dada por um ponto à esquerda ou à direita de $\bar{\lambda}_k$, expressa pelas Eqs. (7) e (8)

$$L_{esq}^b = \sum_{k=0}^{N^b-1} L(\lambda_k) (\lambda_{k+1} - \lambda_k) \quad (7)$$

$$L_{dir}^b = \sum_{k=1}^{N^b} L(\lambda_k) (\lambda_k - \lambda_{k-1}). \quad (8)$$

Após realizar estas somas, fazendo-se a média entre as duas obtêm-se o resultado da integração da banda b , conforme mostra a Eq. (9), usada neste trabalho

$$L^b = \frac{L_{esq}^b + L_{dir}^b}{2}. \quad (9)$$

Por fim, estimativa de clorofila- a é feita a partir de algoritmos que empregam o valor de fator de reflectância bidirecional FR , por sua vez obtido ao aplicar-se na Eq. (3) os valores de radiâncias medidos, para uma reflectância $\rho=0.028$. O algoritmo utilizado foi o *Ocean Chlorophyll 2* versão 4 (OC2v4), que é dado por

$$chl - a (mg / m^3) = 10^{(0.319 - 2.336R + 0.879R^2 - 0.135R^3)} - 0.071, \quad (10)$$

com $R = \log_{10}(Rrs490/Rrs555)$ para o dado orbital e $R = \log_{10}(FR490/FR555)$ para o dado *in situ*.

3. Resultados e discussões

São apresentados resultados de concentração de clorofila- a , a partir da aplicação do algoritmo OC2v4, usando valores de radiância em três estações onde ocorreu “match-up” de até um dia entre a data de aquisição dos dados *in situ* e passagem do satélite. Somente na estação 7456 ocorreu um “match-up” no mesmo dia, enquanto que para as outras estações, são disponíveis imagens do sensor SeaWiFS de um dia anterior (Tabela 2).

Ao aplicar-se na Eq. (5) nos valores de radiâncias *in situ* total L_t e do céu L_{sky} , integrados para as bandas do SeaWiFS (Tabela 3), obtêm-se valores de radiância L_w . Estas radiâncias para as estações 7448, 7456 e 7457, quando comparadas com os valores de radiância normalizada nL_w do sensor SeaWiFS (**Figura 1a** à **Figura 1c**), revelam a importância de se obter um “match-up” o mais preciso possível. De fato, na estação 7456 os valores de radiância foram muito próximos, enquanto que nas outras duas estações, a intensidade de radiação medida no campo foi superestimada com relação aquela obtida como o sensor SeaWiFS.

Tabela 2 – Estações oceanográficas onde foram obtidos dados orbitais e de campo.

	7448		7456		7457	
	SeaWi FS	<i>In Si tu</i>	SeaWi FS	<i>In Si tu</i>	SeaWi FS	<i>In Si tu</i>
Data	26/04	27/04	05/05	05/05	05/05	06/05
Lat. (S)	24, 41	24, 05	23, 77	23, 74	23, 09	23, 09
Long. (W)	44, 65	44, 64	41, 77	41, 75	41, 91	41, 91

Tabela 3 - Radiância total medida L_t e radiância parcial L_{sky} devido à influência da luminosidade do céu.

Centro de Banda (nm)	Radiâncias ($W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$)					
	7448		7456		7457	
	L_t	L_{sky}	L_t	L_{sky}	L_t	L_{sky}
412	3,15E-02	2,93E-01	2,35E-02	2,11E-01	4,87E-02	6,31E-01
443	3,43E-02	2,68E-01	2,60E-02	1,87E-01	5,69E-02	5,90E-01
490	3,79E-02	2,27E-01	2,91E-02	1,55E-01	7,73E-02	5,15E-01
510	2,98E-02	1,92E-01	2,37E-02	1,30E-01	7,49E-02	4,40E-01
555	1,61E-02	1,37E-01	1,36E-02	9,17E-02	6,41E-02	3,22E-01
670	3,18E-03	6,01E-02	3,18E-03	4,01E-02	1,64E-02	1,47E-01

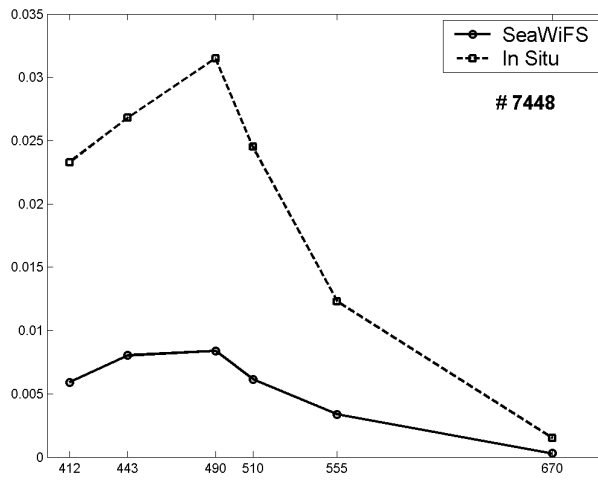
Os valores das radiâncias L_p da placa de referência no campo (**Tabela 4**) foram usados para calcular os fatores de reflectância FR mostrados na **Tabela 5**, os quais são empregadas no algoritmo empírico OC2v4 de estimação de clorofila-*a*. Os perfis verticais de concentração de clorofila-*a* medidos pelo PNF apresentaram um comportamento muito ruidoso, principalmente próximo à superfície conforme se observa na Figura 2a. Com o propósito de reduzir este efeito, a cada metro que o instrumento mede é calculado o valor médio das concentrações neste intervalo de profundidade, obtendo-se o perfil mostrado na Figura 2b.

Finalmente, as concentrações de clorofila-*a* calculadas com o algoritmo OC2v4, usando dados orbitais e *in situ* são comparadas com aquelas obtidas com o PNF e por análise de laboratório (Tabela 6). Os valores de concentração do PNF são relativos às profundidades de 2,57 m, 0,62 m e 1,25 m para as estações 7448, 7456 e 7457, respectivamente. Para profundidades menores que estas o PNF não obteve resposta da fluorescência da água. As amostras analisadas em laboratório foram todas coletadas na superfície do mar.

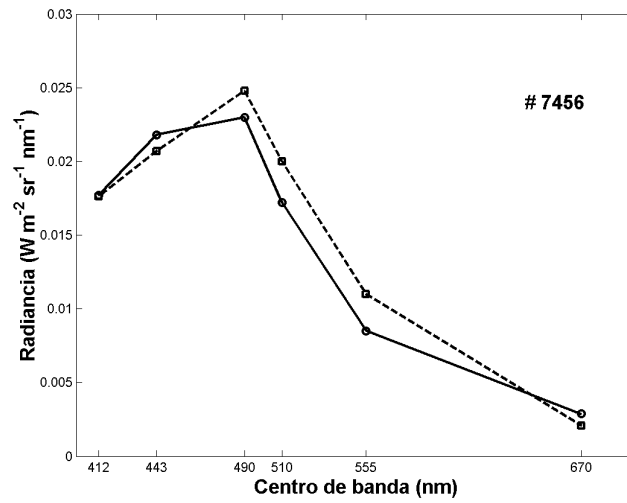
Observa-se na estação 7456 uma diferença significativa entre as concentrações calculadas com o dado orbital e *in situ*, ainda que as radiâncias estejam muito próximas como se pôde observar na Figura 1b. Este fato pode ser explicado em parte pela própria formulação do algoritmo OC2v4, que faz com que uma determinada variação na razão de banda R utilizada, produza uma variação maior no valor de concentração de clorofila-*a* calculado. Por exemplo, para a concentração de $0,222\ mg/m^3$, a correspondente razão de banda é $R = Rrs490/Rrs555 = 2,691$, enquanto que para concentração sendo $0,320\ mg/m^3$, a razão de banda foi $R = FR490/FR555 = 2,271$. Ou seja, uma razão de banda orbital cerca de 18 % maior produziu um resultado de concentração 30 % menor do que aquela obtida com radiância *in situ*.

Entretanto, deve ser levado em conta que uma única estação foi considerada, o que configura uma amostragem extremamente limitada e insuficiente. Para uma análise mais conclusiva, uma quantidade muito maior de pontos de “match-up” deveria estar disponível. Neste caso, é de se supor que eventuais diferenças entre concentrações obtidas com dados orbitais e *in situ*, se diluam em um conjunto mais representativo de estações, trabalhando-se então com os valores médios de concentrações.

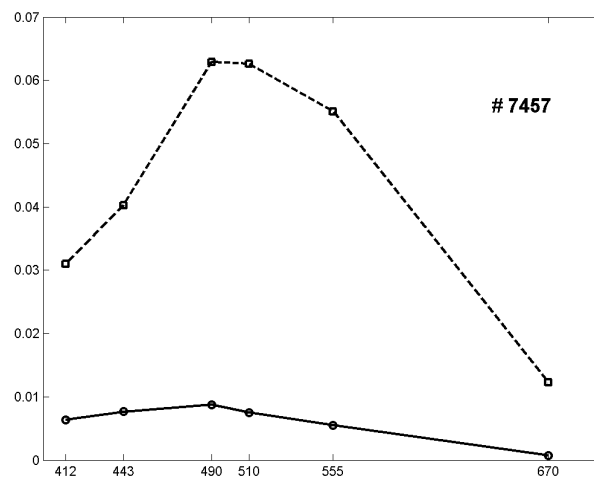
A mesma análise não pôde ser feita com as outras estações, uma vez que uma grande diferença entre as radiâncias foi observada na Figura 1a e Figura 1c. Mesmo assim, fazendo uma análise meramente qualitativa, algumas tendências puderam ser observadas. Claramente a concentração de clorofila-*a* na estação 7457 foi maior que as demais, o que foi confirmado com o dado *in situ*. Isto serve de indicação que a radiância *in situ* pode ser empregada desde que se tenha condições favoráveis, com uma amostragem maior de pontos.



(a)



(b)



(c)

Figura 1 - Radiâncias do sensor SeaWiFS e *in situ* nas estações 7448 (a), 7456 (b) e 7457 (c).

Tabela 4 - Radiância (L_p) *in situ* medida na placa de sulfato de bário ($BaSO_4$).

Centro de Banda (nm)	Radiâncias ($W m^{-2} sr^{-1} nm^{-1}$)		
	7448	7456	7457
412	1,24	1,19	2,64
443	1,54	1,48	3,25
490	2,02	1,90	4,15
510	2,00	1,89	4,10
555	2,04	1,91	4,09
670	1,73	1,62	3,33

Tabela 5– Fator de reflectância FR *in situ*.

Centro de Banda (nm)	Fator de Reflectância FR		
	7448	7456	7457
412	1,96E-02	1,45E-02	1,25E-02
443	1,82E-02	1,34E-02	1,32E-02
490	1,66E-02	1,23E-02	1,61E-02
510	1,30E-02	1,00E-02	1,62E-02
555	6,42E-03	5,39E-03	1,41E-02
670	9,24E-04	1,19E-03	3,81E-03

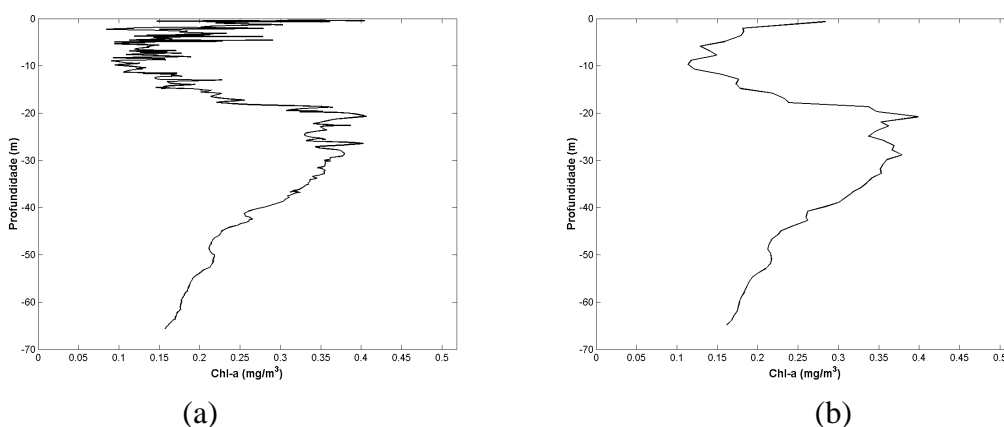


Figura 2 – Perfil original ruidoso de concentração de clorofila-*a* pelo PNF (a) e perfil obtido calculando-se o valor médio da concentrações a cada metro medido (b).

Tabela 6– Concentrações de clorofila-*a* obtidas com dados orbitais e radimétricos *in situ*, obtidas com PNF e a partir de análise fluorométrica de amostras (coletadas na superfície).

Método	clorofila- <i>a</i> (mg/m^3)		
	7448	7456	7457
SeaWi FS - OC2v4	0,250	0,222	0,700
<i>In situ</i> - OC2v4	0,243	0,320	1,484
PNF	0,241	0,283	0,742
Lab.	0,110	0,190	0,930

Portanto, mais campanhas são necessárias para coletar uma quantidade de dados minimamente representativa, a fim de inclusive se desenvolver uma versão regional do algoritmo OCv4, com parâmetros ajustados a partir dos dados coletados. Espera-se que com isso as concentrações de clorofila-*a* com as diferentes abordagens descritas neste trabalho possuam valores mais próximos e com um erro reduzido.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao projeto MCT-PRONEX/DEPROAS (processo nº 368/96) e ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, pelo no embarque no Navio Oceanográfico Prof. W. Besnard; Os autor Roberto P. Souto agradece ao CNPq (processo nº 140217/2001-0) pelo suporte financeiro durante este doutorado; à Dra. Elisabete Caria Moraes da DSR/INPE pelas instruções dadas quanto ao uso e processamento dos dados obtidos com o espectrorradiômetro de campo; à Bacharel em Ciências do Mar Ana Cristina Novelino Penna Franco, à M.Sc. Nilva Brandini e ao M.Sc. Juan Carlos Ugaz Codina, pela ajuda prestada durante trabalho de campo; à tripulação e pesquisadores a bordo do N/Oc. Prof. Besnard.

Referências

- Chalhoub, E.S.; Campos Velho, H.F. Estimation of the optical properties of sea water from measurements of exit radiance. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 72, p. 551-565, 2002.
- Chalhoub, E.S.; Campos Velho, H.F. Multispectral Reconstruction of Bioluminescence Term in Natural Waters. **Applied Numerical Mathematics**, v. 47, p. 365-376, 2003
- Gordon, H.R.; Clark, D.K. Clear water radiances for atmospheric correction of Coastal Zone Color Scanner imagery. **Applied Optics**, v. 20, p. 4175-4180, 1981.
- Mobley, C.D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements, **Applied Optics**, v. 38, n. 36, p. 7442-7455, 1999.
- Nasa/Gsfc - The SeaDAS Development Group SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System). Home page: <http://seadas.gsfc.nasa.gov/>, 2004.
- Neckel, H.; Labs D. The solar radiation between 3300 and 12500Å, **Solar Physics**, v. 90, n. 2, p. 205-258, 1984.
- Analysis of empirical algorithms of surface chlorophyll-a for SeaWiFS in the Southwestern Atlantic Ocean In: XIV Ocean Optics, 2000, Monaco.
- Omachi, C. Y.; Garcia, C. A. E. Analysis of empirical algorithms of surface chlorophyll-a for SeaWifs in the Southwestern Atlantic Ocean. In: Ocean Optics XIV, 2000. **Proceedings...** Monaco: 2000, p. 1184.
- O'Reilly, J. E.; Maritorena, S.; Siegel, D.; O'Brien, M. C.; Toole, D.; Mitchell, B. G.; Kahru, M.; Chavez, F. P.; Strutton, P.; Cota, G.; Hooker, S. B.; McClain, C. R.; Carder, K. L.; Muller-Karger, F.; Harding, L.; Magnuson, A.; Phinney, D.; Moore, G. F.; Aiken, J.; Arrigo, K. R.; Letelier, R.; Culver, M.. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: version 4. In S. B. Hooker, & E. R. Firestone (Eds.), **SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series**, v. 11. **SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses: part 3**, p. 9-23. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center.
- Souto, R.P.; Stephany, S.; Campos Velho, H.F.; Reconstruction vertical profiles of absorption and scattering coefficients from multispectral radiances. **Applied Numerical Mathematics**. (submetido), 2004.
- Steffen, C. A. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 14-19 abr. 1996, Salvador. **Anais...** 1996. Artigos, p. 9-14. CD-ROM. Publicado como: INPE-6163-PRE/2252. Disponível na biblioteca digital *URLib*: <sid.inpe.br/deise/1999/02.01.11.01>.