

Comparação de dados SeaWiFS e MODIS para a região da Bacia de Campos, RJ.

Milton Kampel¹
João Antonio Lorenzetti¹
Cristina Maria Bentz²
Salvador Airton Gaeta³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{milton, loren}@dsr.inpe.br

²Centro de Pesquisas da Petrobras - CENPES
Cidade Universitária Q.7 Ilha do Fundão - 21949-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
cris@petrobras.com.br

³Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico - IOUSP
Praça do Oceanográfico 191 Cidade Universitária - 05508-120 - São Paulo - SP, Brasil
sagaeta@usp.br

Abstract. Chlorophyll-*a* concentration is the most widely used product derived from ocean-color data. The surface chlorophyll-*a* concentrations measured by SeaWiFS and MODIS/AQUA are compared in Campos Basin region, Southwestern South Atlantic for the period 2002 to 2007. The radiometers show a good consistency between the standard chlorophyll-*a* algorithms although SeaWiFS systematically showed higher values. The match-up results indicate good agreement between *in situ* chlorophyll-*a* concentrations and MODIS-derived empirical (OC3M) and semi-analytical (GSM01 and CARDER) estimates, but with a tendency of overestimating higher values (> 0.5 - 1.0 mg.m^{-3}). The chlorophyll concentration in the study area was in the range 0.14 to 2.55 mg.m^{-3} . The OC3M algorithm performed relatively better (rmse-L 0.76, RDP 1.32, r^2 0.82) than the GSM01 and CARDER algorithms (rmse-L 0.82 and 0.97, RDP -22.19 and 32.29, r^2 0.81 and 0.82, respectively). The lack of a more robust bio-optical dataset makes it more difficult the development of regional bio-optical algorithms which can reduce the residual discrepancies.

Palavras-chave: ocean color remote sensing, chlorophyll-*a*, time-series, SW Atlantic, sensoriamento remoto da cor do oceano, clorofila-*a*, séries temporais, Atlântico Sudoeste.

1. Introdução

O *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) foi lançado em agosto de 1997 de modo a colaborar nos estudos sobre a importância do papel dos oceanos nas mudanças climáticas globais. O SeaWiFS superou o sensor antecessor *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS) ao fornecer uma cobertura global a cada 24-48 horas, um esquema de correção atmosférica aperfeiçoado e uma determinação da concentração de clorofila-*a* mais precisa.

Uma vez que as mudanças climáticas ocorrem de forma relativamente lenta nos oceanos, a coleta de longas séries temporais de dados se torna particularmente relevante. Com o lançamento do sensor MODIS a bordo do satélite EOS-AQUA em 2002, tem sido possível manter a aquisição de séries de dados da cor do oceano em escala global.

Os dados dos sensores SeaWiFS e MODIS tem sido utilizados para monitorar a região oceânica da Bacia de Campos, litoral norte do Rio de Janeiro (Bentz et al. 2005). Estes sensores apresentam-se como importantes fontes de dados de satélites para aplicações marinhas. Entretanto, estes dados necessitam ser validados para a região de interesse. Da mesma forma, é importante conhecer como estes dados, coletados por dois sensores diferentes, se correlacionam entre si.

Assim, o objetivo deste trabalho foi comparar estatisticamente séries temporais de concentração de clorofila-*a* estimadas pelos sensores SeaWiFS e MODIS para a região da Baía de Campos e comparar estas estimativas com medidas *in situ* realizadas na área de estudo.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Séries temporais de clorofila

Foram geradas séries temporais de concentração de clorofila-*a* na camada superior do mar (CSM) médias mensais estimadas pelos sensores SeaWiFS e MODIS em oito regiões de 0,5° x 0,5° na área de estudo (Figura 1) pela aplicação dos algoritmos padrões da NASA (O’Reilly et al., 2000). Foram calculadas as “médias climatológicas” mensais referentes ao período de estudo e respectivas anomalias. O período de estudo está compreendido entre julho de 2002 e setembro de 2007. Ainda que a série de dados SeaWiFS tenha se iniciado em setembro de 1997, cabe mencionar que os dados MODIS/AQUA só começaram a ser disponibilizados operacionalmente a partir de julho de 2002. Comparações estatísticas entre as séries temporais foram realizadas por análises de correlação e regressão linear. Também foram calculados o erro quadrático médio linearmente transformado (rmse-L) e o percentual da diferença média relativa (RDP) através das seguintes equações (Carder et al. 2004):

$$rmse - L = 0,5 \left[\left(10^{+rmse} - 1 \right) + \left(1 - 10^{-rmse} \right) \right] \quad (\text{Eq. 1})$$

$$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\log_{10} \left(\frac{CSM_{MOD}}{CSM_{SW}} \right)^2 \right]} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$RDP = \sum_{n=1}^N \left(\frac{CSM_{MOD} - CSM_{SW}}{CSM_{SW}} \right) \frac{1}{N} \times 100\% \quad (\text{Eq. 3})$$

onde CSM_{MOD} é a concentração de clorofila-*a* estimada pelo sensor MODIS e CSM_{SW} pelo SeaWiFS.

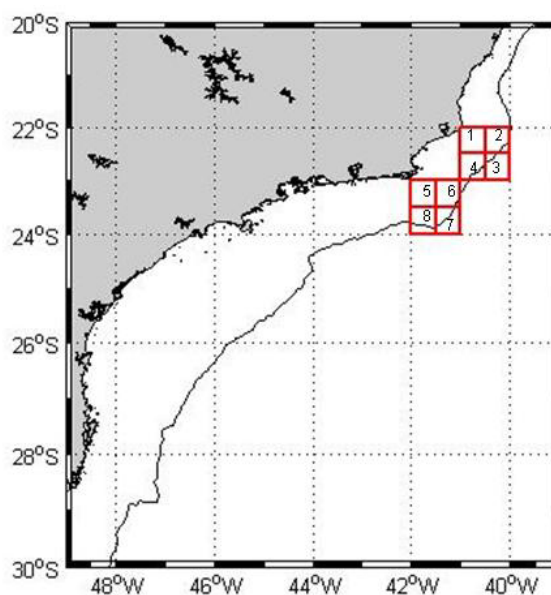


Figura 1 - Localização na costa sudeste brasileira das oito caixas (#1 a #8) com dimensões de 0,5° x 0,5° utilizadas para a geração das séries temporais de valores médios mensais SeaWiFS e MODIS de concentração de clorofila-*a*.

2.2 Dados *in situ*

Foram compilados dados de CSM *in situ* coletados pelo projeto Dinâmica de Plataforma da Região Oeste do Atlântico Sul (DEPROAS) na região da Bacia de Campos, no período de agosto de 2002 (Kampel 2003). Nas mesmas datas de coleta *in situ*, foram processadas digitalmente imagens dos sensores SeaWiFS e MODIS, com resolução nominal de 1 km, de modo a gerar produtos como a concentração de clorofila utilizando-se diferentes algoritmos. Comparações entre as estimativas *in situ* e SeaWiFS já haviam sido realizadas por Kampel (2003), Kampel et al. (2005) e Kampel et al. (2007). Entretanto, somente agora estimativas obtidas com dados MODIS estão sendo comparadas.

Foram utilizados os algoritmos bio-ópticos empíricos *Ocean Chlorophyll 4-bands* - OC4 e *Ocean Chlorophyll 2-bands* - OC2 (O'Reilley et al., 2000), semi-analítico Garver, Siegel, Maritorena version 01 - GSM01 (Maritorena et al., 2002) e redes neurais artificiais NN (Gross et al., 2000) para estimar as concentrações de clorofila-*a* a partir dos dados SeaWiFS. No caso das imagens MODIS, foram utilizados os algoritmos semi-analíticos GSM01 e Carder (Carder et al. 2004), e empírico *Ocean Chlorophyll 3-bands* - OC3M (O'Reilley et al., 2000). Maiores detalhes sobre estes algoritmos podem ser encontrados nas referências bibliográficas citadas anteriormente.

As comparações entre as medidas de CSM *in situ* (CSM_{insitu}) e estimadas por satélites (CSM_{sat}) foram realizadas considerando-se a data da estação oceanográfica. Os pares de dados foram formados entre a CSM_{insitu} e o valor médio de uma janela de 3x3 pixels (9 km x 9 km) centrada na posição geográfica da estação oceanográfica nas imagens SeaWiFS e MODIS equivalentes.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise das séries temporais de clorofila

Nas caixas #1 e #5 foram obtidas as maiores concentrações médias para ambos os sensores SeaWiFS e MODIS, respectivamente (#1= 0,99 e 0,79 mg.m⁻³; #5 = 0,34 e 0,30 mg.m⁻³), típicas de regiões relativamente mais costeiras. Nestas caixas, observou-se aumento da concentração de clorofila entre maio e outubro, com valores máximos nos meses de julho e setembro, em #1 e agosto e setembro, em #5. Estas caixas também apresentaram maior variabilidade, como pode ser observado pelos valores de desvios-padrões (Figura 2).

Todas as caixas apresentaram valores máximos em setembro, com exceção das caixas #3 e #7, com picos em julho e agosto, respectivamente. Sistemáticamente, em todas as caixas, obtiveram-se estimativas de CSM médias SeaWiFS maiores que com dados MODIS (Figura 2).

Barbini et al. (2005) compararam estimativas da concentração de clorofila obtidas a partir de dados SeaWiFS, MODIS/TERRA e MODIS/AQUA no Oceano Austral, durante o verão de 2003. Segundo estes autores, os três radiômetros concordaram satisfatoriamente de acordo com suas respectivas acurácias e as diferenças residuais puderam ser reduzidas com o ajuste de algoritmos bio-ópticos regionais. Na Figura 3 do artigo citado, pode-se ver claramente a sub-estimativa da CSM MODIS/AQUA em relação à CSM SeaWiFS na área e período do estudo.

Franz (2003) também observou uma sub-estimativa MODIS/TERRA da CSM em relação à CSM SeaWiFS, entre outubro de 2000 e março de 2003 para o oceano mundial. Folkestad et al. (2007) compararam estimativas de clorofila obtidas com dados MERIS, MODIS/AQUA e SeaWiFS na região do Mar do Norte, entre fevereiro e abril de 2004, obtendo um alto nível de consistência entre os produtos de CSM padrão para todos os sensores. As estimativas SeaWiFS sobre-estimaram as estimativas MODIS, principalmente para concentrações mais altas de clorofila (> 1,0 mg.m⁻³).

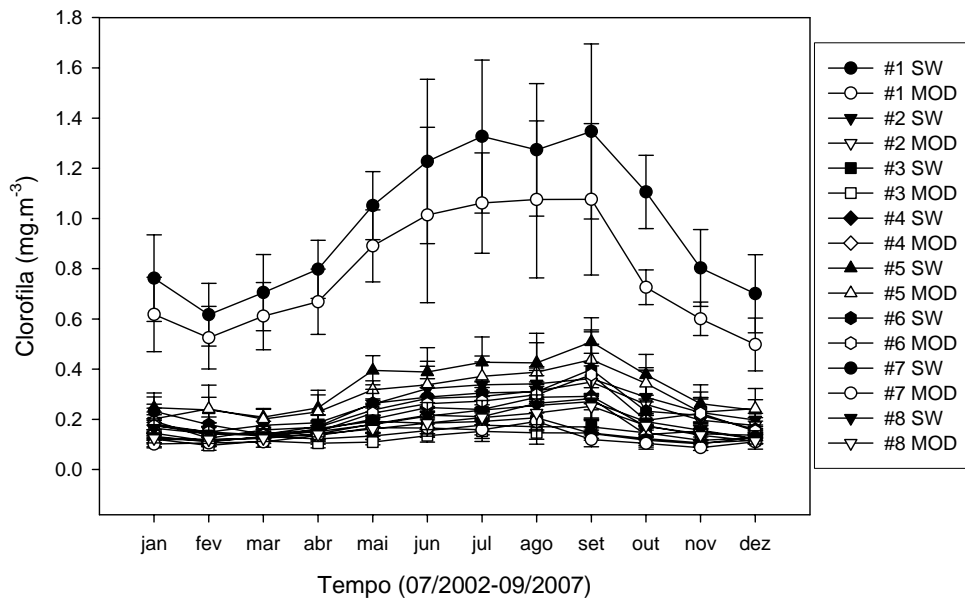


Figura 2 - Séries temporais das concentrações de clorofila (CSM) médias mensais SeaWiFS (SW) e MODIS (MOD) do período entre julho de 2002 e setembro de 2007 nas oito caixas (#1 a #8).

Na Figura 3 a seguir, são apresentadas as séries temporais de CSM das oito caixas #1 a #8 estimadas pelos sensores SeaWiFS e MODIS, entre julho de 2002 e julho de 2007. Além da diferença nas concentrações médias e máximas e da sazonalidade evidente em praticamente todas as séries temporais, podem-se destacar algumas anomalias (Figura 4). Em #1, observam-se anomalias significativas em janeiro de 2005, setembro de 2006 e em abril e julho de 2007. Em #2, pode-se destacar as ocorrências de outubro-novembro de 2002, março e agosto de 2005 e setembro de 2006, assim como em setembro de 2006, fevereiro e julho de 2005 em #4. Em #6, notam-se anomalias mais significativas em julho de 2005, janeiro, maio e setembro de 2006. Em #3, #5, #7 e #8 as anomalias foram relativamente menores (não mostradas aqui por falta de espaço).

Apesar das diferenças observadas entre os valores de CSM estimados com dados SeaWiFS e MODIS, existe uma alta correlação entre ambas as estimativas, em toda a área de estudo (Tabela 1). Os maiores coeficientes de determinação foram obtidos nas caixas #4 e #8 ($r^2=0,89$ e $0,88$), ainda que os menores valores de *rmse-L* tenham sido obtidos para #2 e #8 ($0,24$) e de RDP para #2 e #6 ($-9,07$ e $-8,92$).

3.2 Comparações com dados *in situ*

Os valores de CSM *in situ* variaram entre $0,14$ e $2,55 \text{ mg.m}^{-3}$, com média de $0,49 (\pm 0,46) \text{ mg.m}^{-3}$. Em linhas gerais, as concentrações encontradas por Kappel (2003) são similares às observadas por Gaeta et al. (1993) na região da Baía de Campos e por Aidar et al. (1993) para o litoral norte de São Paulo durante períodos de inverno. De forma geral, os algoritmos semi-analíticos e empírico aplicados aos dados MODIS superestimaram as concentrações de clorofila mais altas, com valores $> 1,0 \text{ mg.m}^{-3}$ (Figura 5).

O algoritmo que apresentou o melhor desempenho relativo foi o OC3M, com menores valores de *rmse-L* ($0,76$), RDP ($1,32$) e r^2 igual a $0,82$ (Tabela 2). Mas, os algoritmos semi-analíticos CARDER e GSM01 apresentaram resultados semelhantes, sendo que o último teve um desempenho ligeiramente melhor que o primeiro (Tabela 2). Estes resultados podem ser considerados satisfatórios para um conjunto de dados que também inclui águas do Caso II, típicas da região mais costeira ($\text{CSM} > 1,0 \text{ mg.m}^{-3}$). Segundo Carder et al. (1999), em águas do Caso II costeiras a matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) pode absorver mais luz

no azul do que o fitoplâncton. Desta forma, as estimativas mais altas de concentração de clorofila por satélite podem ser causadas pelo efeito do CDOM ou ainda, dos detritos uma vez que estes não covariam com o fitoplâncton em regiões com diferentes fontes de componentes opticamente ativos (IOCCG 2000).

Tabela 1. Comparação dos valores de concentração de clorofila-*a* estimados pelos sensores MODIS e SeaWiFS nas oito caixas de 0,5 x 0,5° (#1 a #8) na região da Bacia de Campos, RJ entre 07/2002 e 09/2007.

Caixas	rmse-L	RDP	r ²	Declividade	Intersecção	N
#1	0,41	-19,47	0,83	0,78	0,02	63
#2	0,24	-9,07	0,86	0,93	-0,01	63
#3	0,26	-12,93	0,83	0,84	0,00	63
#4	0,28	-10,13	0,89	0,96	-0,01	63
#5	0,27	-9,49	0,83	0,81	0,03	63
#6	0,27	-8,92	0,80	0,95	-0,01	63
#7	0,28	-13,68	0,85	0,99	-0,02	63
#8	0,24	-11,28	0,88	0,88	0,00	63

Tabela 2. Comparação dos valores de concentração de clorofila-*a* estimados por diferentes algoritmos aplicados aos dados MODIS em relação às medidas fluorimétricas *in situ*.

Algoritmo	rmse	rmse-L	RDP	r ²	Declividade	Intersecção	N
OC3M	0,23	0,76	1,32	0,82	3,38	-0,71	31
CARDER	0,29	0,97	32,29	0,82	4,05	-0,82	30
GSM01	0,25	0,82	-22,19	0,81	1,62	-0,24	30

Em comparações pretéritas realizadas com diferentes algoritmos aplicados a dados SeaWiFS, as melhores performances foram obtidas com os algoritmos empíricos OC4 e OC2, que explicaram 65% e 60% da variância dos dados, respectivamente, nos períodos de inverno de 2001 e 2002 (Kampel 2003, Kampel et al. 2005, Kampel et al. 2007). Garcia et al. (2006) também avaliaram os algoritmos empíricos OC4v4 e OC2v4 para a região costeira do Atlântico Sudoeste, constatando uma superestimação da CSM, principalmente nas estações de verão, com rmse-L de 0,54 e 0,49, RDP de 26,9 e 11,0 e r² de 0,82 e 0,83, respectivamente.

4. Conclusões

Foram geradas e analisadas, séries temporais de CSM com dados SeaWiFS e MODIS entre julho de 2002 e setembro de 2007, para a região da Bacia de Campos, litoral norte do Rio de Janeiro. As estimativas de CSM com dados SeaWiFS foram sistematicamente maiores que as obtidas com dados MODIS. Mas há uma alta correlação entre ambas as estimativas, em toda a área de estudo durante o período considerado.

Os três algoritmos de satélite aplicados a dados MODIS, apresentaram desempenho similar e considerado satisfatório para a estimativa da CSM, quando comparados a dados *in situ*. Porém, para melhor testar e validar o desempenho dos algoritmos é necessário dispor de um bom conjunto de dados bio-ópticos, incluindo os coeficientes de espalhamento e de absorção pelo fitoplâncton, CDOM e material particulado em suspensão. Além de permitir a avaliação dos algoritmos globais podem também, embasar o desenvolvimento de modelos regionais incluindo uma melhor caracterização dos componentes opticamente ativos.

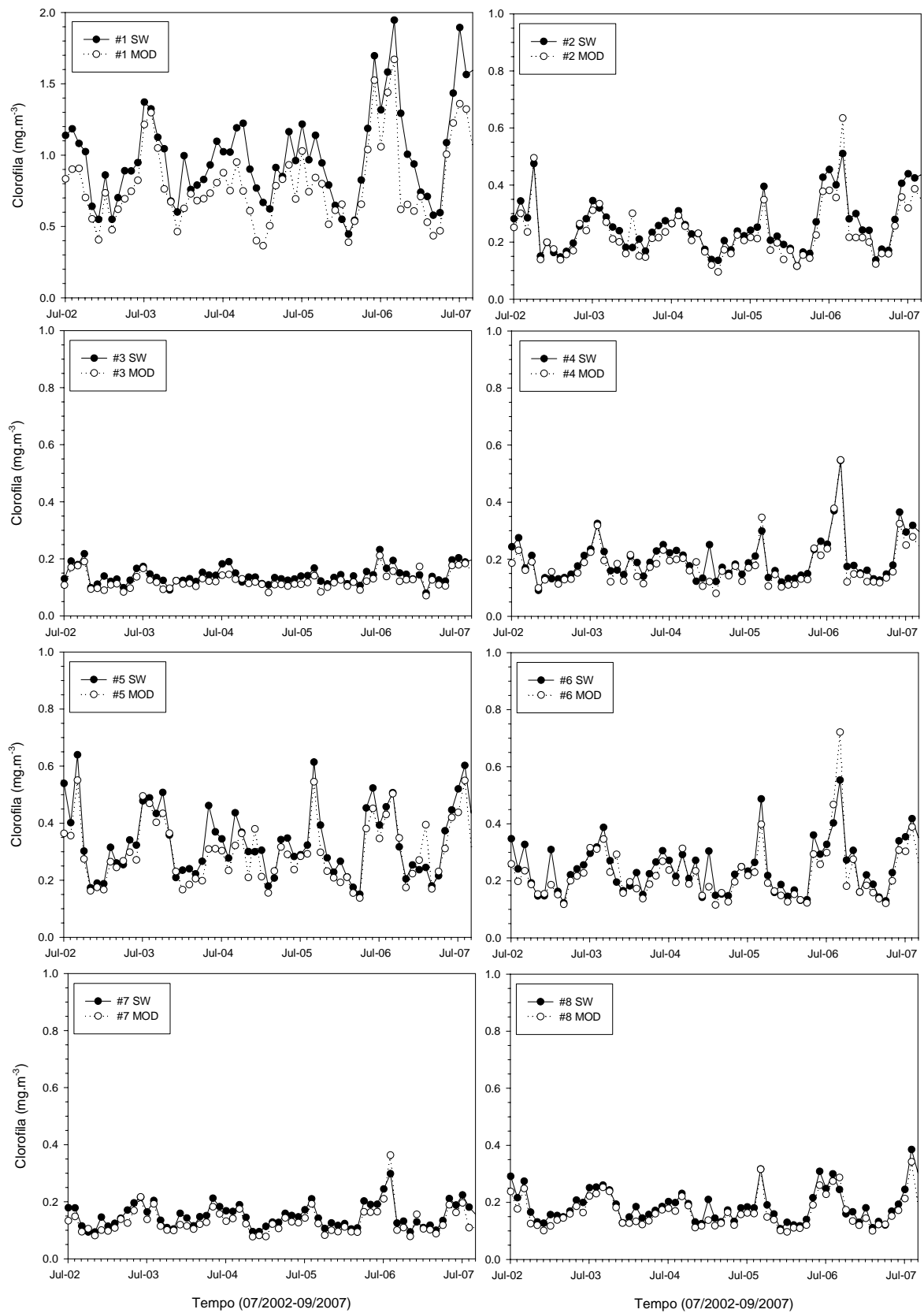


Figura 3 - Séries temporais das concentrações de clorofila (CSM) SeaWiFS (SW) e MODIS (MOD) do período entre julho de 2002 e setembro de 2007 nas oito caixas (#1 a #8).

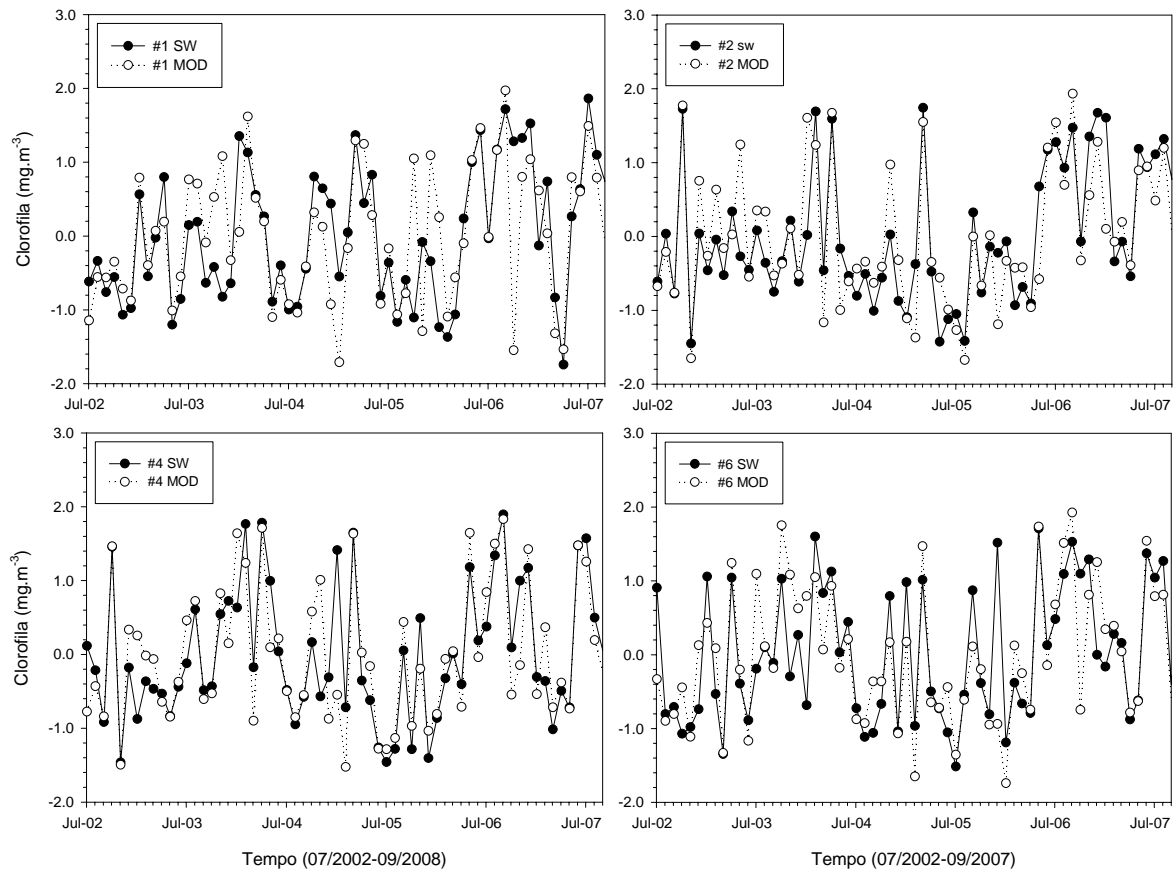


Figura 4. Séries temporais de anomalias normalizadas das concentrações de clorofila (CSM) SeaWiFS (SW) e MODIS (MOD) do período entre julho de 2002 e setembro de 2007 nas caixas #1, #2, #4 e #6.

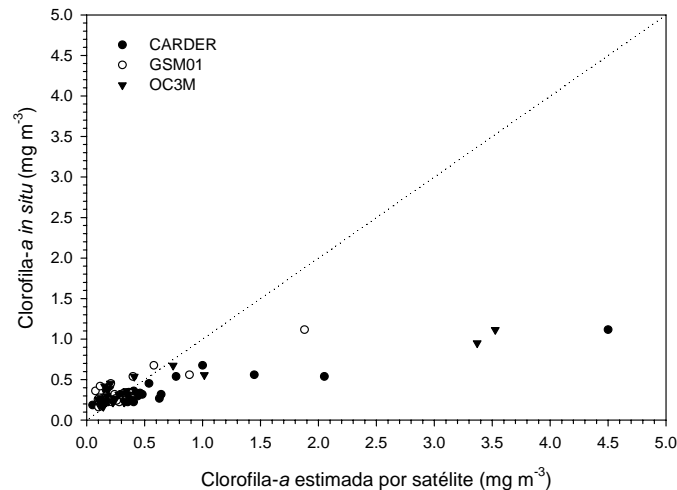


Figura 5. Comparação dos desempenhos dos algoritmos CARDER, GSM01 e OC3M aplicados aos dados MODIS em relação às estimativas de concentração de clorofila *in situ* obtidas pelo projeto DEPROAS no inverno de 2002 (Fonte: Kampel 2003).

Agradecimentos

O Centro de Pesquisas da PETROBRAS financiou o projeto FITOSAT. O projeto DEPROAS foi financiado pelo PRONEX/CNPq/FINEP integrando o programa GLOBEC.

Referências Bibliográficas

- Aidar, E.; Gaeta, S. A.; Giancesella-Galvão, F.; Kutner, M. B.; Teixeira, C. Ecossistema costeiro subtropical: nutrientes dissolvidos, fitoplâncton e clorofila-a e suas relações com as condições oceanográficas na região de Ubatuba, SP. **Publicação Especial Instituto Oceanográfico**, v. 10, p. 9-943, 1993.
- Barbini, R.; Colao, F.; Fantoni, R.; Fiorani, L.; Okladnikov, I.G.; Palucci, A. Comparison of SeaWiFS, MODIS-Terra and MODIS-Aqua in the Southern Ocean, **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 11, p. 2471-2478, 2005.
- Bentz, C.M.; Politano, A.T.; Genovez, P. Monitoramento ambiental de áreas costeiras e oceânicas com múltiplos sensores orbitais. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 57/01, p. 43-47, 2005.
- Carder, K. L.; Chen, F. R.; Lee, Z. P.; Hawes, S. K.; Kamykowski, D. Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n.C3, p. 5403-5422, 1999.
- Carder, K. L.; Chen, F. R.; Cannizzaro, J. P.; Campbell, J. W.; Mitchell, B. G. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. **Advances in Space Research**, v. 33, n.7, p. 1152-1159, 2004.
- Folkestad, A.; Pettersson, L.H.; Durand, D.D. Inter-comparison of ocean colour data products during algal blooms in the Skagerrak. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 3, p. 569-592, 2007.
- Franz, B.A.; Werdell, P.J.; Meister, G.; Bailey, S.W.; Eplee Jr., R.E.; Feldman, G.C.; Kwiatkowska, E.; McClain, C.R.; Patt, F.S.; Thomas, D. The continuity of ocean color measurements from SeaWiFS to MODIS. In: Earth Observing Systems X, SPIE, 2003, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 2003. Artigos, p. 1-13. CD-ROM. ISBN 0277-786X/05/\$15, doi: 10.1117/12.620069 (Proc. Of SPIE 58820W-1).
- Gaeta, S.A.; Metzler, P.M.; Lopes, R.M. Plâncton e Produtividade Primária na plataforma da costa norte do Estado do Rio de Janeiro-Campanha de Verão (dez/91-jan/92). Relatório do Projeto Monitoramento Oceânico da Bacia de Campos FUNDESPA/GEOMAP-PETROBRÁS, 1993.
- Garcia, V. M. T.; Signorini, S.; Garcia, C. A. E.; McClain, C. R. Empirical and semi-analytical chlorophyll algorithms in the southwestern Atlantic coastal region (25-40°S and 60-45°W). **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n.8, p. 1539-1562, 2006.
- Gross, L.; Thiria, S.; Frouin, R.; Mitchell, B.G. Artificial neural networks for modeling the transfer function between marine reflectance and phytoplankton pigment concentration. **Journal Geophysical Research**, v.105, n.2, p. 3483-3496, 2000.
- IOCCG, 2000, Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters, in Sathyendranath, S., ed., **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group**, Dartmouth, IOCCG, p. 140.
- Kampel, M. **Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados *in situ* na costa sudeste brasileira**. 2003. 272p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo. 2003.
- Kampel, M.; Gaeta, S. A., Lorenzetti, J. A., Pompeu, M. Estimativa por satélite da concentração de clorofila *a* superficial na costa sudeste brasileira, região oeste do Atlântico Sul: Comparação dos algoritmos SeaWiFS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2005. Artigos, p.3633-3641. CD-ROM. On-line. ISBN 85-17-00018-8.
- Kampel, M.; Gaeta, S.A.; Pompeu, M.; Lorenzetti, J.A.; Rudorff, F.M.; Frouin, R.J. Bio-optical variability in coastal waters of southeast Brazil. In: Optical Engineering + Applications, part of Optics + Photonics, 2007, Coastal Ocean Remote Sensing, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 2007. v.6680. p.1 – 8, CD-ROM. DOI: 10.1117/12.736647.
- Maritorena, S.; Siegel, D.A.; Peterson, A.R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. **Applied Optics**, v.41, p. 2705-2714. 2002.
- O'Reilley, J.E.; Maritorena, S.; O'Brien, M.C.; Siegel, D.A.; Toole, D.; Menzies, D.; Smith, R.C.; Mueller, J.L.; Mitchell, B. G.; Kahru, M.; Chavez, R P.; Strutton, P.; Cota, G.F.; Hooker, S.B.; McClain, C.R.; Carder, K.L.; Mueller-Karger, F.; Harding, L.; Magnuson, A.; Phynney, D.; Moore, G.F.; Aiken, J.; Arrigo, K.R.; Letelier, R.; Culver, M. **SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3, Volume 11**. In: S. B. Hooker e E. R. Firestone (ed). NASA Tech. Memo. 2000-2206892. Greenbelt, Md, NASA Goddard Space Flight Center, 2000.