

Produção primária fitoplanctônica estimada por satélite na costa sudeste brasileira: comparação de algoritmos

Milton Kampel¹
Salvador A. Gaeta²

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

²Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo - IOUSP
Praça do Oceanográfico - 05508-900 - São Paulo - SP, Brasil
sagaeta@usp.br

Abstract. This study provides a satellite-based estimate of potential primary production in the Brazilian Southeast coast from *in situ* and Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) ocean color data. A non-spectral and vertically homogeneous semi-analytical algorithm and a spectral vertically non-homogeneous numerical algorithm were applied to the satellite ocean color data, which incorporate simultaneously measured *in situ* photosynthetic parameters. A vertically generalized production model was also tested. The best performing ocean colour remote sensing primary productivity algorithm tested agreed with the ¹⁴C-based estimates within a factor of 2.

Palavras-chave: phytoplankton primary production, ocean color remote sensing, Brazilian Southeastern coast, produção primária fitoplanctônica, sensoriamento remoto da cor do oceano, costa sudeste brasileira.

1. Introdução

Mapas globais da concentração de clorofila na superfície do oceano são obtidos por sensores orbitais da cor do oceano. Esses sensores multiespectrais são capazes de mapear a concentração de clorofila, como indexador da biomassa fitoplanctônica, detectando variações espectrais da radiação emergente do mar. Quando as concentrações de clorofila aumentam, a luz azul é mais absorvida e menos retroespalhamento ocorre na direção do espaço. Ainda que uma cobertura global possa ser obtida nominalmente a cada 1 ou 2 dias, a resolução temporal real é reduzida a 5 – 10 dias devido à cobertura de nuvens. Entretanto, a cobertura fornecida pelo sensoriamento remoto orbital é muito maior que a possível de ser obtida por outros meios convencionais.

Uma das principais aplicações de dados globais de clorofila é a estimativa da produção primária. Juntamente com outros dados ambientais tais como, a temperatura da superfície do mar e a irradiância solar incidente, por exemplo, os dados de concentração de clorofila *a* podem ser utilizados para estimar a produtividade primária marinha em qualquer região do oceano (Longhurst et al. 1995, Antoine et al. 1996, Behrenfeld e Falkowski 1997).

Os modelos matemáticos ou procedimentos para estimar a produção primária por satélite são conhecidos como algoritmos de produtividade primária (Campbell et al. 2002). O presente trabalho tem como objetivo estimar a produção primária fitoplanctônica na costa sudeste brasileira através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados *in situ*. Três algoritmos de produtividade primária foram aplicados aos dados de satélite e comparados estatisticamente com as estimativas *in situ* pelo cálculo da diferença média e valor *root mean square (rms)*.

2. Material e Métodos

Medidas *in situ*

Os dados *in situ* foram obtidos em quatro cruzeiros oceanográficos do projeto DEPROAS na costa sudeste brasileira, nos períodos de verão e inverno de 2001 e 2002 (Kampel 2003). A área de estudo abrange a plataforma continental e o talude entre o Cabo de São Tomé (22°S), RJ e a Ilha de São Sebastião (23°50'S), SP. Um total de 35 (76) e 27 (66) estações oceanográficas foram ocupadas durante o verão e inverno de 2001 (2002). Amostras de água foram coletadas em garrafas de *Niskin* para análise fluorimétrica (Welschmeyer 1994, Schoaf e Lium 1976) da concentração de clorofila, nas profundidades de 0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150 e 200 m. A base da zona eufótica foi determinada pela profundidade de desaparecimento do disco de Secchi (Poole e Atkins 1929), ou com o emprego de um perfilador de fluorescência natural (PNF-300, *Biospherical Instruments Inc.*) com a finalidade de se estimar o coeficiente de atenuação difusa (K_d , m^{-1}).

Experimentos de curvas luz – fotossíntese (P-E) foram realizados para amostras de superfície. Todas as 70 medidas dos parâmetros fotossintéticos P-E foram baseadas no método do ^{14}C (Steeman-Nielsen, 1952). Os valores de produção primária horária ($mgC\ m^{-3}\ h^{-1}$) foram calculados utilizando-se a equação descrita por Teixeira (1973). Os dados foram normalizados em relação à concentração de clorofila e ajustados pela equação sugerida por Platt et al. (1980) para se obter os valores de inclinação inicial (α^B , $mgC\ (mgClo)^{-1}\ (W\ m^{-2})\ h^{-1}$) e número de assimilação (P_{max}^B , $mgC\ (mgClo)^{-1}\ h^{-1}$). As taxas de produção primária horárias foram convertidas em diárias considerando-se a irradiância fotossinteticamente ativa (PAR) incidente integrada tanto para o período de incubação (2-4 h), como para o fotoperíodo. A produção primária *in situ* da coluna de água (PP_{EU}) foi integrada até a profundidade equivalente a 1% da irradiância superficial pelo método dos trapézios ($gC\ m^{-2}\ d^{-1}$). Maiores detalhes sobre a metodologia utilizada no processamento dos dados *in situ* pode ser encontrada em Kampel (2003).

Perfil Vertical de Biomassa

Estimativas da produção primária diária integrada na coluna de água usando dados de sensoriamento remoto da cor do oceano, segundo a abordagem proposta por Platt e Sathyendranath (1988), com modificações sugeridas por Sathyendranath et al. (1995), requerem quatro classes ou tipos de informação: cobertura de nuvens, clorofila superficial, parâmetros do perfil vertical de biomassa na coluna de água e parâmetros fotossintéticos. O perfil vertical de biomassa pode ser obtido *in situ* ou por modelo. Aqui se adotou o modelo Gaussiano como proposto por Platt et al. (1988). O conceito da curva de Gauss-deslocada nada mais é do que uma curva de Gauss sobreposta a uma constante de fundo (*background*). Este modelo pode ser descrito pela equação:

$$B(z) = f(z; h, \sigma, B_0, Z_M) = B_0 + \frac{h}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-Z_M)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Eq.2})$$

onde $B(z)$ é a biomassa ($mg\ m^{-3}$) em função da profundidade z (m, positiva para baixo); B_0 ($mg\ m^{-3}$) representa a concentração de fundo sobre a qual a curva de Gauss, cujo pico é centrado na profundidade Z_M (m), é sobreposta; h é o parâmetro de amplitude do máximo de clorofila ($mg\ m^{-2}$) e σ é o parâmetro de escala da largura do pico de clorofila (m). A partir das observações *in situ* de clorofila a , foram estimados os parâmetros médios da curva de Gauss-deslocada.

Sensoriamento remoto

Imagens da cor do oceano do sensor *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) foram adquiridas nos mesmos períodos dos cruzeiros oceanográficos e processadas de modo a fornecer informações sobre os campos superficiais de concentração de clorofila *a*, com a utilização do algoritmo empírico padrão da NASA, *Ocean Chlorophyll 4-bands*, versão 4 - OC4v4 (O'Reilley et al. 2000), como sugerido por Kampel (2003) e Kampel et al. (2005).

Modelos de produção primária por satélite

Modelo de Produtividade de Bedford – BPM1

O modelo de produtividade de Bedford (BPM1), na forma de um *Wavelength Integrated Model* - WIM, não espectral e verticalmente homogêneo (perfil vertical de biomassa constante), tem como representação formal a seguinte equação:

$$PP_{EU} = BP_{\max}^B \int_{t=0}^D \int_{z=0}^{z_{eu}} \left[1 - \exp[-\alpha^B E_0^m \text{sen}(\pi t/D) e^{-Kz}] / P_{\max}^B \right] dz dt \quad (\text{Eq.3})$$

Onde B é a biomassa (mgClo m^{-3}), D é o fotoperíodo (h), z é a profundidade (m), α^B é o espectro de ação fotossintético ($\text{mgC (mgClo)}^{-1} (\text{W m}^{-2})^{-1} \text{nm}^{-1}$), P_{\max}^B é o número de assimilação ($\text{mgC (mgClo)}^{-1} \text{h}^{-1}$), K é o coeficiente de atenuação difusa (m^{-1}) e E_0^m é a irradiância ao meio dia (W m^{-2}), sendo que a função senoidal no modelo descreve a distribuição de irradiância durante o dia. Platt et al. (1990) obtiveram uma solução analítica no caso do perfil vertical de biomassa ser considerado uniforme na coluna de água (isto é, B , K , α^B e P_{\max}^B são constantes) e assumindo uma variação senoidal da irradiância ao longo do dia. Esta solução analítica foi utilizada no presente trabalho para estimar a produção primária diária integrada na zona eufótica (PP_{EU}).

Modelo de Produtividade de Bedford – BPM2

O modelo de produtividade de Bedford, na forma de um WIM, espectral e com perfil vertical de biomassa não homogêneo, foi denominado aqui como BPM2. A produção primária diária na coluna de água é estimada por integração numérica de um modelo espectral. O perfil vertical de clorofila é modelado pela curva de Gauss-deslocada, como descrito em Platt et al. (1988). A produção absoluta diária na coluna de água é definida pela integral no tempo e profundidade:

$$PP_{EU} = \int_0^D \int_0^{\infty} B(z) \int_{PAR} \Pi(z, \lambda, t) d\lambda dz dt \quad (\text{Eq.4})$$

onde $\Pi = P_{\max}^B (1 - \exp(-\alpha^B(\lambda) E(z, \lambda, t) / P_{\max}^B))$ é a taxa de fotossíntese ($\text{mgC (mgClo)}^{-1} \text{h}^{-1} (\text{nm})^{-1}$) em função da profundidade z (m), comprimento de onda λ (nm) e tempo t (h); D é o fotoperíodo (h); $B(z)$ é a biomassa (mgClo m^{-3}); $\alpha^B(\lambda)$ é o espectro de ação fotossintético ($\text{mgC (mgClo)}^{-1} (\text{W m}^{-2})^{-1} \text{nm}^{-1}$); $E_0(z, \lambda, t)$ é a luz disponível (W m^{-2}) e P_{\max}^B é o número de assimilação ($\text{mgC (mgClo)}^{-1} \text{h}^{-1}$).

Platt et al. (1988) demonstraram como um perfil não uniforme pode ser representado por uma curva Gaussiana-deslocada. Esta equação matemática (ou outra equivalente) forma a base da estrutura vertical da biomassa incorporada no cálculo da produção primária. O cálculo da produção primária baseado em um perfil de pigmento não uniforme não é facilmente tratável usando-se métodos analíticos, e nenhuma solução deste tipo foi ainda apresentada. Portanto, o desenvolvimento da solução envolve métodos de integração numérica. A

complexidade aumenta, quando se introduz a dependência espectral da fotossíntese na formulação.

Modelo de Produção Generalizado Verticalmente – VGPM

O modelo desenvolvido por Behrenfeld e Falkowski (1997), do tipo *Vertically Generalized Production Model* (VGPM), também foi utilizado no presente trabalho para estimar a produção primária diária integrada na zona eufótica. No presente trabalho, foi utilizada uma versão simplificada do modelo VGPM, sem considerar a fotoinibição:

$$PP_{EU} = 0,66125P_{opt}^B \left[\frac{E_0}{E_0 + 4,1} \right] Z_{EU} \times C_{sat} \times D \quad (\text{Eq.5})$$

onde P_{opt}^B é a taxa fotossintética máxima específica da clorofila, E_0 é a irradiância fotossinteticamente ativa (PAR) superficial total (Einstein $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$); D é o fotoperíodo (h); C_{sat} é a concentração de clorofila a obtida pelo SeaWiFS (mgClo m^{-3}); Z_{EU} é a profundidade da zona eufótica calculada a partir de C_{sat} , de acordo com Morel e Berton (1989). Outros autores (Bukata et al. 1995) mostraram que em águas do Caso 1, o regime de absorção de luz é dominado pela clorofila a e pela própria água, de modo que Z_{EU} pode ser expresso em função da clorofila total. Desta forma, Z_{EU} foi calculado como a seguir:

$$Z_{EU} = 568,2 \langle C \rangle_{TOT}^{-0,746} \text{ quando } \langle C \rangle_{TOT} < 10 \text{ mg m}^{-2} \quad (\text{Eq.6})$$

$$Z_{EU} = 200,0 \langle C \rangle_{TOT}^{-0,293} \text{ quando } \langle C \rangle_{TOT} > 10 \text{ mg m}^{-2} \quad (\text{Eq.7})$$

Para aplicação em sensoriamento remoto, $\langle C \rangle_{TOT}$ pode ser relacionado com C_{sat} da seguinte forma (Morel e Berthon, 1989)

$$\langle C \rangle_{TOT} = 40,6 C_{sat}^{0,425} \quad (\text{Eq.9})$$

Para a estimativa de P_{opt}^B , o modelo dependente da temperatura sugerido por Behrenfeld e Falkowski (1997) foi implementado:

$$P_{opt}^B = aT^7 + bT^6 - cT^5 + d \quad (\text{Eq.10})$$

onde $a = -3,27 \times 10^{-8}$, $b = 3,14132 \times 10^{-6}$, $c = -1,348 \times 10^{-4}$, $d = 2,462 \times 10^{-3}$, $e = -0,0205$, $f = 0,0617$, $g = 0,2749$, $h = 1,2956$.

3. Resultados e Discussão

De 70 experimentos *in situ*, somente foi possível obter estimativas por satélite em 46 pontos, devido à limitação por cobertura de nuvens. A **Figura 1** apresenta os diagramas de dispersão dos três algoritmos de produção primária por satélite testados para o conjunto completo de dados, respectivamente. Os coeficientes encontrados nas regressões lineares entre as produções primária integradas na coluna de água *in situ* (PP_{EU}) e as estimativas feitas por satélite (BPM1, BPM2 e VGPM), também são mostrados (r^2 , a e b), juntamente com os valores *rms* e número de pontos (n).

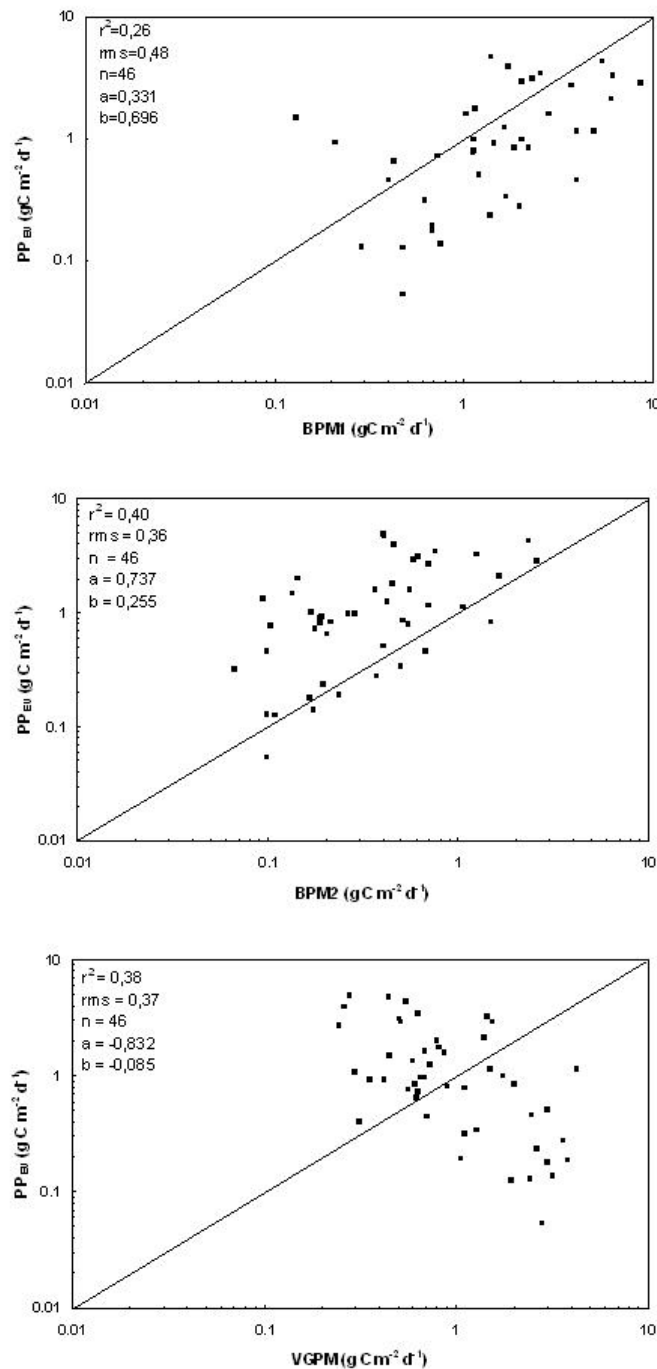


Figura 1 - Diagramas de dispersão das produções primária integradas na coluna de água estimadas por satélite (BPM1, BPM2 e VGPM, ver texto) *versus* as medidas *in situ* (PP_{EU}) para o conjunto completo de dados. São também mostrados os coeficientes das regressões lineares (r^2 , a e b), número de pontos (n) e valor *rms*.

O algoritmo BPM2 apresentou o melhor desempenho para o conjunto completo de dados ($r^2 = 0,40$ e $rms = 0,36$) em relação a BPM1 ($r^2 = 0,26$ e $rms = 0,48$, nível de confiança de 95%) e VGPM ($r^2 = 0,38$ e $rms = 0,37$), respectivamente. Ainda que o coeficiente encontrado na regressão estatística de VGPM tenha sido maior que para BPM1, deve-se atentar que as estimativas VGPM aparecem inversamente correlacionadas com as estimativas *in situ*, o que não era esperado.

O modelo VGPM fornece uma relação empírica derivada “semi-analiticamente” para resolver a produção primária diária na zona eufótica. O VGPM é um modelo semi-analítico no sentido que foi desenvolvido a partir de fatores que teoricamente afetam e controlam a fotossíntese marinha. Mas por outro lado, as calibrações e simplificações de determinadas relações empíricas entre variáveis ambientais desenvolvidas para este modelo podem não ser aplicáveis ao ambiente natural considerado neste trabalho.

Balch et al. (1989) avaliaram diferentes algoritmos para estimar a produção primária integrada na coluna de água utilizando dados de satélite. Enquanto que os modelos empíricos testados explicaram de 28% a 42% da variância dos dados, um modelo semi-analítico explicou no máximo, 24%. Balch et al. (1992) testaram diferentes algoritmos de produtividade para estimar a produção primária integrada. Em média, os algoritmos testados explicaram menos que 50% da variância dos dados. Siegel et al. (2001) mostraram que diferentes modelos globais para estimativa da produção primária integrada por satélite só conseguiram explicar menos que 40% da variância dos dados obtidos em uma série temporal de 6 anos na região do Mar do Sargaçó. Nos resultados apresentados por Campbell et al., (2002), os modelos com melhor desempenho concordaram com as estimativas baseadas no método do ^{14}C por um fator de 2.

De modo geral, as estimativas obtidas com o modelo BPM1 (BPM2) superestimaram (subestimaram) as produções primárias diárias integradas na coluna de água neste trabalho. O modelo BPM1 considera o perfil vertical de biomassa homogêneo, que ocorre mais tipicamente em regiões mais próximas da costa. Já o modelo BPM2 integra o máximo subsuperficial de clorofila que ocorre tipicamente em regiões mais afastadas da costa.

Em várias das abordagens empregadas na modelagem da produção primária fitoplânctônica através de sensoriamento remoto assume-se que os parâmetros fotossintéticos e as variáveis que definem o perfil vertical de biomassa sejam estáveis dentro de regiões e estações do ano (Platt et al 1991). Estas considerações levam ao conceito das Províncias Biogeoquímicas (Longhurst et al 1995), dividindo os oceanos em áreas com distintas características físicas, químicas e biológicas onde estas considerações podem ser aplicadas. Diversos trabalhos realizados na área de estudo sugeriram divisões para a plataforma continental sudeste brasileira (Castro 1996, Gaeta 1999, Gonzalez-Silvera et al. 2004, entre outros). Uma análise preliminar dos resultados deste trabalho permitiu a identificação de uma heterogeneidade entre as regiões de plataforma e talude.

A **Figura 2** mostra os diagramas de dispersão dos algoritmos BPM1 e BPM2 testados para os dados de plataforma continental e talude, respectivamente. Considerando os coeficientes de determinação encontrados pelas análises de regressão linear entre PP_{EU} e os modelos testados, observamos que a maior variância explicada (70%) foi obtida pelo modelo BPM2, no domínio do talude (**Fig.2**, em baixo). Este mesmo modelo também explicou 56% no domínio de plataforma (não mostrado). Já o modelo BPM1, explicou no máximo 38% da variância dos dados, no domínio de plataforma (**Fig.2**, em cima).

4. Conclusões

Neste trabalho, comparações entre algoritmos de produtividade primária por satélite empregando dados SeaWiFs e medidas *in situ* foram realizadas em águas de plataforma e talude da costa sudeste brasileira, região oeste do Atlântico Sul.

Mesmo que os algoritmos de produção primária baseados em dados de sensoriamento remoto ainda apresentem incertezas da ordem de um fator de 2 quando comparados a dados *in situ*, a cobertura espacial e temporal obtida através dos dados de satélites os tornam uma ferramenta de pesquisa inestimável. Por outro lado, ainda que as informações obtidas por satélites constituam uma base de dados consistente e significativa, o cálculo da produtividade

primária através do sensoriamento remoto requer informações regionais acerca das características fotossintéticas do fitoplâncton, que por sua vez, permanecem bastante subamostradas.

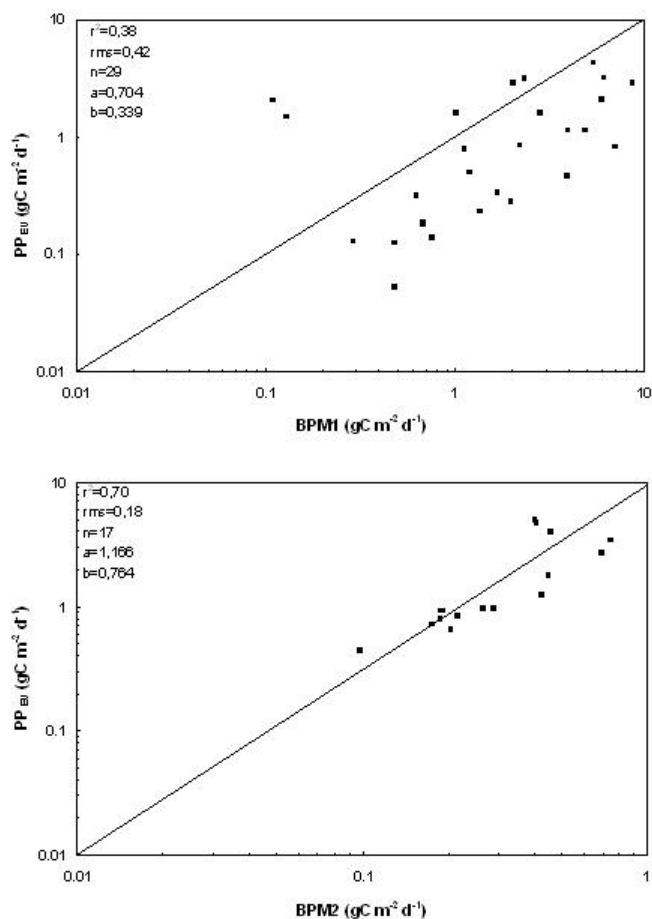


Figura 2 - Diagramas de dispersão das produções primária integradas na coluna de água estimadas por satélite pelo modelo BPM1 para a plataforma continental (em cima), e pelo modelo BPM2 para o talude (em baixo) *versus* as medidas *in situ* (PP_{EU}). São também mostrados os coeficientes das regressões lineares (r^2 , a e b), número de pontos (n) e valor *rms*.

Referências

- Antoine, D.; Andre, J.M.; Morel, A. Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. **Global Biogeochemical Cycles**, v.10, p. 57-69, 1996.
- Balch, W.M.; Eppley, R.W.; Abbott, M.R. Remote sensing of primary production. II. A semi-analytical algorithm based on pigments, temperature and light. **Deep-Sea Research I**, v.36, n.8, p. 1201-1217, 1989.
- Balch, W.M.; Evans, R.; Brown, J.; Feldman, G.; McClain, C.; Esaias, W. The remote sensing of ocean primary productivity: use of a new data compilation to test satellite algorithms. **Journal Geophysical Research**, v.97, n.2, p. 2279-2293, 1992.
- Behrenfeld, M.J.; Falkowski, P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. **Limnology Oceanography**, v.42, p. 1-20, 1997.
- Bukata, R.P.; Jerome, J.H.; Kondratyev, K.Y.; Pozdnyakov, D.V. **Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters**. Boca Raton: CRC Press, 1995. 362 p.
- Campbell, J.; et al. Comparison of algorithms for estimating ocean primary production from surface chlorophyll, temperature, and irradiance. **Global Biogeochemical Cycles**, v.16, n.3, p. 9-1 a 9-15, 2002.

- Castro, B. M. **Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo**. 1996. 248p. Tese (Livre-Docência) - Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo. 1996.
- Gaeta, S.A. **Produção Primária na Região Oeste do Atlântico Sul**. 1999. 140p. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo. 1999.
- Gonzalez-Silvera, A.; et al. Biogeographical regions of the tropical and subtropical Atlantic Ocean off South America: classification based on pigment (CZCS) and chlorophyll-*a* (SeaWiFS) variability. **Continental Shelf Research**, v.24, p. 983-1000, 2004.
- 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.
- Longhurst, A.; Sathyendranath, S.; Platt, T.; Caverhill, C. An estimate of global Primary Production in the ocean from satellite radiometer data. **Journal Plankton Research**, v.17, n.6, p. 1245-1271, 1995.
- Morel, A.; Berthon, J.F. Surface pigments, algal biomass profile, and potential production of the euphotic layer: relationships reinvestigated in view of remote sensing applications. **Limnology Oceanography**, v.34, p. 1545-1562, 1989.
- O'Reilly, J.E.; et al. **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.
- Platt, T.; Bird, D.F.; Sathyendranath, S. Critical depth and marine primary production. **Proceedings of the Royal Society**. Series B, v.246, p. 205-217, 1991.
- Platt, T.; Gallegos, C.L.; Harrison, W.G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. **Journal Marine Research**, v.38, p. 687-701, 1980.
- Platt, T.; Sathyendranath, S. Oceanic primary production: estimation by remote sensing at local and regional scales. **Science**, v.241, p. 1613, 1988.
- Platt, T.; Sathyendranath, S.; Caverhill, C.M.; Lewis, M.R. Ocean primary production and available light: further algorithms for remote sensing. **Deep-Sea Research I**, v.35, p. 855-879, 1988.
- Platt, T.; Sathyendranath, S.; Platt, T.; Sathyendranath, P. Primary production by phytoplankton: analytic solutions for daily rates per unit area of water surface. **Proceedings of the Royal Society**. Series B, v. 241, p. 101-111, 1990.
- Poole, H.H.; Atkins, W.R.G. Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year. **Journal Marine Biology Assoc.**, v.16, p. 297-324, 1929.
- Sathyendranath, S.; Longhurst, A.; Caverhill, C.; Platt, T. Regionally and seasonally differentiated primary production in the North Atlantic. **Deep-Sea Research I**, v. 1, n.42, p. 1773-1802, 1995.
- Shoaf, W.T.; Liem, B.W. Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulfoxide. **Limnology Oceanography**, v.21, p. 926-928, 1976.
- Siegel, D. A.; Westberry, T.K.; O'Brien, M.C.; Nelson, N.B.; Michaels, A.F.; Morrison, J.R.; Scott, A.; Caporelli, E.A.; Sorensen, J.C.; Maritorena, S.; Garver, S.A.; Brody, E.A.; Ubante, J.; Hammer, M.A. Bio-optical modeling of primary production on regional scales: the Bermuda BioOptics project. **Deep-Sea Research II**, v.48, p. 1865-1896, 2001.
- Steeman-Nielsen, E. The use of radio-active carbon (¹⁴C) for measuring organic production in the sea. **Journal Cons. Explor. Mer.**, v.18, p. 117-140, 1952.
- Teixeira, C. Introdução aos métodos para medir a produção primária do fitoplâncton marinho. **Bolm Inst. oceanogr.**, v.22, p. 59-92, 1973.
- Welschmeyer, N.A. Fluorometric analysis of chlorophyll *a* in the presence of chlorophyll *b* and pheopigments. **Limnology Oceanography**, v. 39, n. 8, p. 1985-1992, 1994.