

## Caracterização do *bloom* anual de clorofila na Bacia de Campos (RJ) a partir de dados de satélite

Milton Kampel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
milton@dsr.inpe.br

**Abstract.** An important property monitored through ocean color remote sensing is the concentration of chlorophyll in aquatic systems, an index of phytoplankton biomass. Time series of satellite-derived surface chlorophyll concentration (CSM) from 2002 to 2011 were used to investigate the phenology of phytoplankton bloom in the Campos Basin, located at the Southwestern-South Atlantic Ocean. The seasonal phytoplankton cycle is the dominant mode of temporal variability. The use of a Gaussian function to fit the temporal variability of CSM allowed the characterization of the timing and magnitude of the annual phytoplankton bloom in the slope and continental shelf areas. In both areas, CSM data showed that the maximum surface bloom occurs in austral winter (July), having initiated in the autumn (May). The timing of the bloom as estimated from satellite chlorophyll data is used as a metric showing promise as informative indicator for the pelagic ecosystem.

**Palavras-chave:** ocean color remote sensing, phytoplankton bloom, Campos Basin, sensoriamento remoto da cor do oceano, floração fitoplanctônica, Bacia de Campos.

### 1. Introdução

O sensoriamento remoto orbital é capaz de adquirir uma visão sinóptica do oceano, que quando integrada a medidas *in situ* e modelos numéricos, permite evoluir a descrição e o entendimento do oceano Atlântico sudoeste. São muitos os parâmetros meteo-oceanográficos que podem ser estimados e monitorados por satélite. As aplicações de dados de satélite são tão amplas que é possível considerar este meio de aquisição de informações para a oceanografia como um todo – física, química, biológica e geológica – tão eficaz como as informações obtidas por métodos tradicionais.

Com dados de sensoriamento remoto da cor do oceano, pode-se estimar a concentração de clorofila na superfície do mar (CSM) e utilizá-la como índice de biomassa fitoplanctônica. Estas imagens oferecem uma observação sinóptica de características biológicas de sistemas dinâmicos como as frentes oceânicas, ressurgências e vórtices de mesoescala. Estudos sobre o papel do oceano no ciclo global do carbono (Fasham, 2003) e níveis atmosféricos de CO<sub>2</sub> (Falkowski et al., 2000), também são realizados com dados da cor do oceano.

O fitoplâncton oceânico é responsável por aproximadamente metade da produção primária líquida da biosfera global (Field et al., 1998). Dados de sensoriamento remoto da cor do oceano têm sido utilizados para estimar a produção primária fitoplanctônica em escala global (Longhurst, 1995; Behrenfeld e Falkowski, 1997; Friedrichs et al., 2009). Mais recentemente, dados de satélite foram utilizados para mostrar mudanças de longo período na CSM global (Martinez et al., 2009). Entretanto, resultados contraditórios foram obtidos sobre a diminuição ou o aumento da biomassa global oceânica entre os anos 1980 e 2000 (Antoine et al., 2005; Greig e Conkright, 2005). Ainda, Boyce et al. (2010) mostraram declínio da concentração global de fitoplâncton no último século.

O ciclo sazonal do crescimento fitoplanctônico é um fator chave da bomba biológica do carbono e da transferência de energia para níveis tróficos mais altos (Henson et al., 2009). As variabilidades no *timing* e na magnitude dos *blooms* (florações) fitoplanctônicos podem ter impactos significativos no desenvolvimento zooplanctônico (Rey et al. 1987) e na sobrevivência de larvas de peixes (Platt et al, 2003).

Variações na concentração de clorofila e não produção primária fitoplanctônica são atribuídas a variações em fatores físicos, como temperatura da superfície do mar, vento e

deposição de ferro, associados a mudanças climáticas globais (Behrenfeld et al., 2006). O crescimento inicial do *bloom* fitoplanctônico tem sido associado também, a diversos fatores, como variações na radiação incidente e processos de mistura gerados pelo vento (Henson et al., 2009), entre outros.

O *timing* do *bloom* é um dos fatores mais importantes que regulam o ciclo ecológico no oceano. Diante disso, o objetivo do presente trabalho foi modelar o *bloom* fitoplanctônico anual, isto é, o acúmulo de biomassa fitoplanctônica indexada pela CSM estimada por satélite, na região da Bacia de Campos, RJ.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Dados MODIS

Imagens médias mensais de CSM foram geradas para a região da Bacia de Campos, a partir de dados do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo do satélite EOS-AQUA. Foram utilizados dados em formato HDF, com resolução espacial de 4 km, obtidos do *Ocean Biology Processing Group* (OBPG), do *Goddard Space Flight Center* (GSFC), NASA, compreendendo o período entre julho de 2002 e dezembro de 2011. As concentrações de clorofila foram estimadas com o emprego da versão mais recente do algoritmo padrão da NASA, OC3Mv6, reprocessamento R2010.0 concluído em 2011 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/WIKI/OCReproc.html>). O algoritmo operacional para estimativa da CSM (O'Reilly et al. 2000) foi atualizado com base em dados *in situ* NOMAD v2. O NOMAD é uma base global de dados bio-ópticos representativa de diferentes tipos de água, incluindo regiões costeiras e *offshore*. A forma do algoritmo descreve o melhor ajuste polinomial que relaciona a concentração de clorofila (log-transformada) com razões de reflectâncias de sensoriamento remoto (também log-transformadas). A forma do polinômio atual é consistente com as versões anteriores, como segue (Equação 1):

$$CSM = 10^{(a_0 + a_1 * X + a_2 * X^2 + a_3 * X^3 + a_4 * X^4)} \quad (1)$$

onde  $X = \log_{10}(R_{sr1}/R_{sr2})$  é a razão máxima entre as reflectâncias de sensoriamento remoto nas bandas do azul ( $R_{sr1} = 443$  ou  $489$  nm) e verde ( $R_{sr2} = 547$  nm). Os coeficientes da versão 6 do algoritmo OC3M são:  $a_0 = 0,2424$ ;  $a_1 = -2,7423$ ;  $a_2 = 1,8017$ ;  $a_3 = 0,0015$ ;  $a_4 = -1,2280$ .

A partir da base de dados MODIS, foram gerados mapas de CSM médios para cada mês do ano, calculando-se a média dos valores em cada ponto de grade no período considerado (07/2002 a 12/2011). Foram extraídas as séries temporais de valores médios mensais de CSM MODIS e respectivos desvios-padrão para regiões de "plataforma" e "talude" na Bacia de Campos (Figura 1), no período considerado.

### 2.2 Modelagem do *bloom* fitoplanctônico

A fim de se modelar o *bloom* anual na área de estudo, ajustaram-se os valores médios mensais de CSM com uma função temporal Gaussiana. Esta função foi utilizada previamente por outros autores, inicialmente para analisar o perfil vertical de pigmento (por exemplo, Platt et al., 1988; Kampel, 2003), e subsequentemente, a série temporal de CSM obtida por satélite durante o *bloom* de primavera, que também apresenta uma distribuição similar com um pico anual (Siegel et al., 2002; Platt et al., 2008; Navarro et al., 2012). A função Gaussiana descrevendo a série temporal de CSM é dada pela Equação 2 a seguir:

$$CSM(t) = CSM_0 + \frac{h}{\sqrt{2\pi}\sigma} * \exp\left[-\frac{(t - m_{\max})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

onde  $CSM_0$  é a linha-de-base da concentração de clorofila ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ),  $m_{\max}$  é o mês do pico,  $\sigma$  (mês) é o desvio-padrão da curva de Gauss e define a largura do pico;  $h/\sqrt{2\pi}\sigma$  define a concentração do pico;  $h$  ( $\text{mg}/\text{m}^3$  mês) é a integral da CSM total acima da linha-de-base. Este modelo foi ajustado às séries anuais de CSM entre janeiro e dezembro, utilizando o método de mínimos quadrados. O *timing* do *bloom* fitoplanctônico pode ser identificado pela avaliação da época na qual os eventos na série temporal de CSM ocorrem. Além da época em que a concentração máxima é observada ( $m_{\max}$ ), definiu-se o início do *bloom* ( $m_{\text{ini}}$ ) como a época em que a CSM aumenta 10% acima do valor mediano (Siegel et al., 2002).

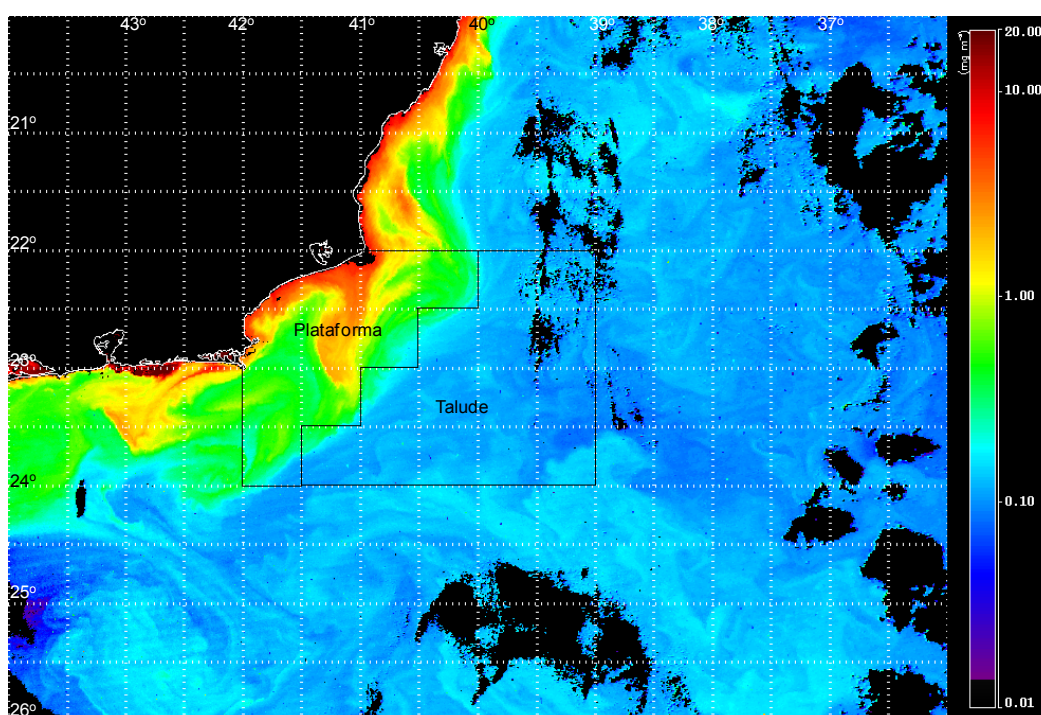


Figura 1: Identificação das áreas de “plataforma” e “talude” utilizadas para a extração das séries temporais de valores médios mensais de concentração de clorofila da superfície do mar, estimados a partir de dados MODIS (Fundo: imagem CSM MODIS de 26/08/2010).

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Médias mensais e séries temporais de CSM

Na Figura 2 a seguir, são apresentadas as séries temporais de CSM das regiões de plataforma e talude estimadas pelo sensor MODIS, entre 07/2002 e 12/2011. De modo geral, pode-se observar a ocorrência de valores de CSM mais altos na região de plataforma, como esperado. Apesar das diferenças observadas, existe uma alta correlação entre as séries de valores médios de CSM ( $R=0,85$ ) e uma evidente sazonalidade em ambas as séries temporais,

A Figura 3 mostra a variação sazonal dos campos de CSM na Bacia de Campos e adjacências. No período de verão (dezembro a fevereiro), observa-se o menor valor mínimo ( $0,043 \text{ mg}/\text{m}^3$ ) e médio ( $0,159 \pm 0,434 \text{ mg}/\text{m}^3$ ) de CSM, respectivamente. Cabe mencionar que junto à costa, podem ocorrer valores relativamente altos de CSM ( $> 5 \text{ mg}/\text{m}^3$ ), associados a eventos de ressurgência costeira e aporte continental. O verão é a principal estação chuvosa na

região sudeste brasileira, que é banhada por rios e estuários desaguando na região da Bacia de Campos. No início do outono (março a maio), os valores médios de CSM ainda permanecem relativamente baixos ( $0,161 \pm 0,434 \text{ mg/m}^3$ , em março e  $0,175 \pm 0,460 \text{ mg/m}^3$ , em abril). Mas em maio, já se observam valores máximos de CSM iguais a  $0,412 \text{ mg/m}^3$ , na plataforma. Esta é uma época de transição entre o verão e o inverno, com mudanças rápidas nas condições de tempo e redução nas taxas de precipitação. No período de inverno (junho a agosto), observa-se um aumento da CSM em toda a área e os maiores valores médio e mínimos anuais de CSM ( $0,207 \pm 0,518 \text{ mg/m}^3$  e  $0,100 \text{ mg/m}^3$ , respectivamente), ocorrendo em julho. No início da primavera (setembro a novembro), o valor médio de CSM em toda a área permanece relativamente alto ( $0,242 \pm 0,573 \text{ mg/m}^3$ ). A primavera é marcada pela transição entre a estação seca (inverno) e a estação chuvosa (verão). No decorrer do período, as concentrações médias de clorofila vão diminuindo até novembro ( $0,176 \pm 0,481 \text{ mg/m}^3$ ).

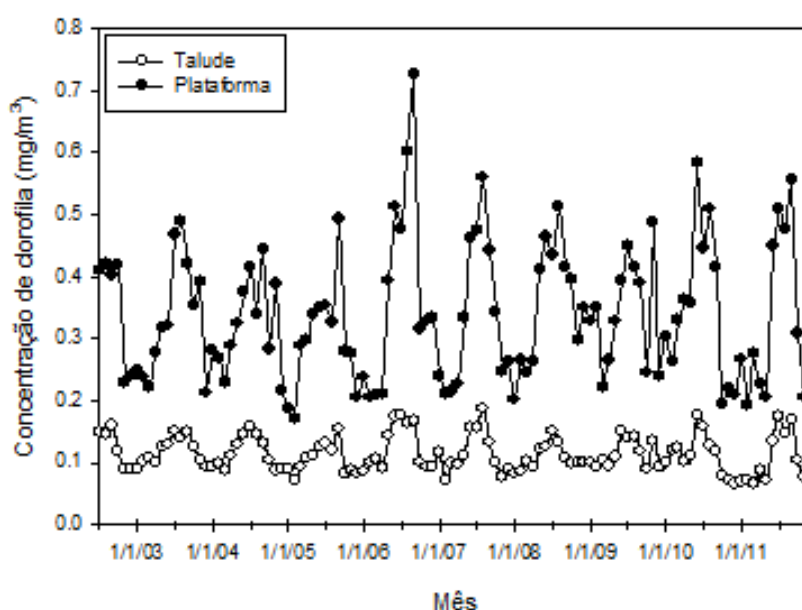


Figura 2 - Séries temporais de concentração de clorofila MODIS, entre 07/2002 e 12/2011, das regiões de plataforma e talude na Bacia de Campos, RJ (ver Figura 1).

A Figura 4 mostra as séries temporais de CSM médias mensais MODIS “climatológicas” do período 07/2002-12/2011, nas regiões de plataforma (A) e talude (B), como definidas na Figura 1. Em ambas as regiões, observa-se no verão, os menores valores de CSM mínimos ( $0,171 \text{ mg/m}^3$  em fevereiro, na plataforma e  $0,066 \text{ mg/m}^3$  em dezembro, no talude) e médios ( $0,240 \pm 0,054 \text{ mg/m}^3$  em fevereiro, na plataforma e  $0,086 \pm 0,012 \text{ mg/m}^3$  em dezembro, no talude). Nos meses de março e abril, os valores médios de CSM permanecem relativamente baixos, tanto na plataforma como no talude ( $0,258 \pm 0,044 \text{ mg/m}^3$  e  $0,098 \pm 0,012 \text{ mg/m}^3$ , respectivamente). Mas a partir de maio observa-se elevação das concentrações de clorofila. No talude, os maiores valores anuais médio ( $0,155 \pm 0,015 \text{ mg/m}^3$ ) e máximo ( $0,188 \text{ mg/m}^3$ ) de CSM ocorrem no período de inverno, nos meses de julho e agosto, respectivamente. Na plataforma, os maiores valores médio ( $0,470 \pm 0,102 \text{ mg/m}^3$ ) e máximo ( $0,726 \text{ mg/m}^3$ ) ocorrem no início da primavera (setembro). A partir de outubro, as concentrações de clorofila diminuem até valores típicos de verão, com valor mínimo de  $0,205 \text{ mg/m}^3$ , na plataforma e  $0,072 \text{ mg/m}^3$ , no talude, no mês de novembro.

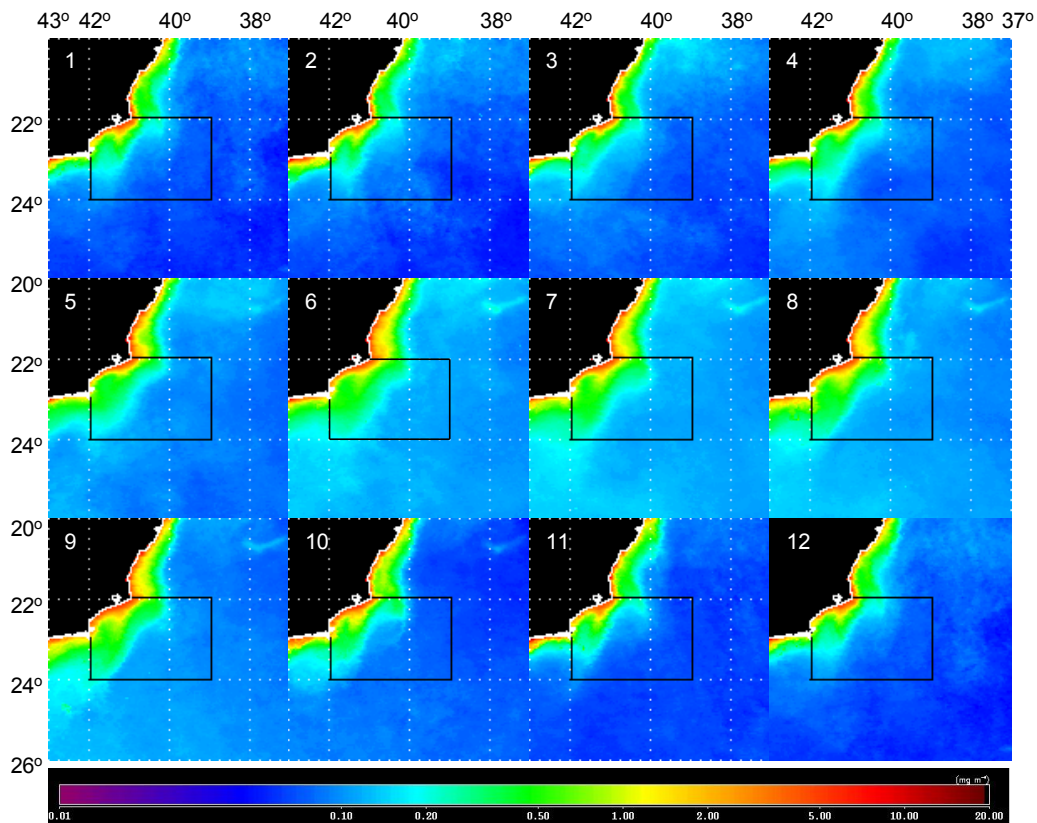


Figura 3 – Médias mensais climatológicas de concentração de clorofila MODIS no período 07/2002-12/2011.

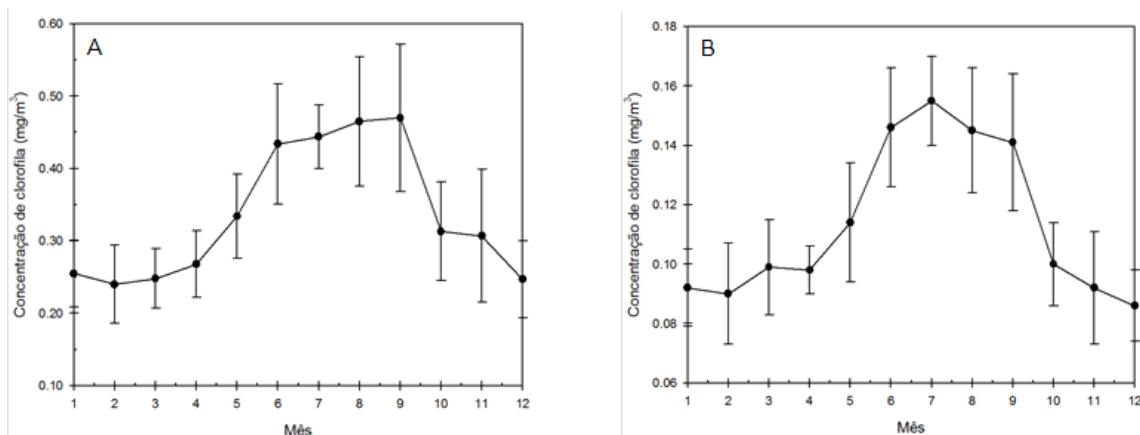


Figura 4 - Séries temporais “climatológicas” das concentrações de clorofila MODIS média mensal de 07/2002 a 12/2011, das regiões de plataforma (A) e talude (B), na Bacia de Campos, RJ (ver Figura 1).

Trabalhos anteriores apresentaram dados de CSM medidos *in situ* na área de estudo. Gonzalez-Rodriguez et al. (1992) descreveram uma variação da CSM na região de Cabo Frio, entre 0,5 e 6,0 mg/m<sup>3</sup>, de acordo com a fase de desenvolvimento da ressurgência. Gaeta et al. (1993) e Gaeta et al. (1994) apresentaram valores de CSM médio iguais a 0,60±1,93 mg/m<sup>3</sup> e 0,24±0,27 mg/m<sup>3</sup> na plataforma do Rio de Janeiro durante períodos de verão e de inverno, respectivamente. Moser e Giancesella-Galvão (1997) mostraram valores médios de CSM de 5,30±6,05 mg/m<sup>3</sup> próximo à costa e 0,20±0,20 mg/m<sup>3</sup> no talude, no verão e 0,46±0,33 mg/m<sup>3</sup> e 0,22±0,18 mg/m<sup>3</sup>, no inverno, na região de Cabo Frio. Na mesma região de Cabo Frio,

Kampel (2003) obteve valores médios de CSM no verão de 2001 iguais a  $0,53 \pm 0,54 \text{ mg/m}^3$  sobre a plataforma e  $0,26 \pm 0,19 \text{ mg/m}^3$ , no talude e  $0,75 \pm 0,49 \text{ mg/m}^3$  na plataforma e  $0,33 \pm 0,17 \text{ mg/m}^3$  no talude, no inverno do mesmo ano. Kampel et al. (2009a) observaram uma variação de 0,01 a  $0,2 \text{ mg/m}^3$ , com valor médio de CSM igual a  $0,12 \pm 0,04 \text{ mg/m}^3$ , típicos das águas oligotróficas da CB, na região da Bacia de Campos, em novembro de 2004. Kampel et al. (2009b) compararam séries temporais de CSM MODIS e do sensor SeaWiFS na região da Bacia de Campos, no período 2002-2007. Foi observada uma alta correlação entre ambas as estimativas em toda a área de estudo, com valores de CSM máximos em setembro.

### 3.2 Modelagem do *bloom* fitoplanctônico

O uso de uma função Gaussiana para representar a variabilidade temporal da CSM permite sintetizar a dinâmica do processo de floração fitoplanctônica na Bacia de Campos. Facilita também, a análise em resposta aos forçantes físicos em diferentes escalas. A Tabela 1 apresenta os parâmetros médios do ajuste Gaussiano para as curvas de CSM médias mensais das regiões de plataforma (Figura 5A) e talude (Figura 5B), incluindo as amplitudes do pico do bloom ( $h/\sqrt{2\pi}\sigma$ ), o timing ( $m_{\max}$ ) e a largura do pico ( $\sigma$ ).

Tabela 1 – Parâmetros obtidos pelo ajuste Gaussiano para o *bloom* nas regiões de plataforma e talude, na Bacia de Campos, entre 07/2002 e 12/2011.  $CSM_0$  é a linha-de-base da concentração de clorofila,  $h/\sqrt{2\pi}\sigma$  é amplitude do pico,  $\sigma$  é a largura do pico,  $m_{\max}$  é o tempo (mês) do pico e  $m_{\text{ini}}$  marca o tempo (mês) de início do *bloom*.

	Plataforma	Talude
$CSM_0$ ( $\text{mg/m}^3$ )	0,24	0,09
$h/\sqrt{2\pi}\sigma$ ( $\text{mg/m}^3$ )	0,24	0,07
$\sigma$ (meses)	1,91	1,69
$m_{\max}$ (meses)	7,63	7,25
$m_{\text{ini}}$ (meses)	5,67	5,67

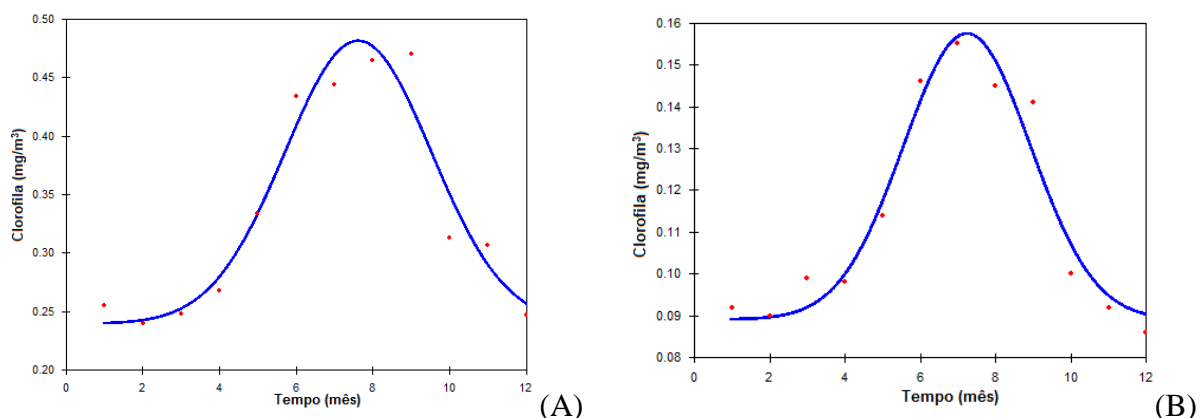


Figura 5 - Função Gaussiana (linha azul) ajustada à série de valores médios de CSM MODIS (círculos vermelhos), no período 07/2002-12/2011, nas regiões de plataforma (A) talude (B) da Bacia de Campos, RJ (ver Figura 1).



Limitou-se aqui a analisar o padrão médio calculado para o período de estudo, comparando-se os domínios de plataforma e talude. A  $CSM_0$  apresentou valores geralmente mais baixos no talude ( $0,09 \text{ mg/m}^3$ ) do que na plataforma ( $0,24 \text{ mg/m}^3$ ), de forma similar ao que foi obtido para a amplitude do pico ( $0,07$  e  $0,24 \text{ mg/m}^3$  no talude e na plataforma, respectivamente). A largura do pico no *bloom* foi relativamente maior na plataforma (1,91 meses) do que no talude (1,69 meses), enquanto que o *timing* foi praticamente coincidente em ambos os domínios, ocorrendo no período de inverno (7,63 meses na plataforma e 7,25 meses no talude). De forma similar, o início do *bloom* foi o mesmo tanto na plataforma como no talude, ocorrendo no final do outono (5,67 meses).

Segundo Dandonneau et al. (2004), o pico do *bloom* se dá no inverno em  $20^\circ\text{S}$  (julho) e  $40^\circ\text{S}$  (agosto), no oceano Pacífico sul. De acordo com Henson et al. (2009), o início do *bloom* na região subtropical do Atlântico Norte também ocorre no inverno, enquanto que nas regiões subpolares ocorre na primavera (maio). Kahru et al. (2011) mostraram que o pico do *bloom* entre  $20^\circ\text{N}$ - $30^\circ\text{N}$  (ao longo de  $37^\circ\text{W}$ ), no oceano Atlântico norte, ocorre no inverno (fevereiro), também apresentando um gradual incremento do *timing* na direção norte. Esta variação latitudinal no *timing* pode ser associada a uma transição entre um sistema de alta latitude onde o *bloom* é disparado em condições de aumento de temperatura, luz e estabilidade vertical (Sverdrup, 1953; Siegel et al., 2002) e um sistema de latitudes mais baixas onde o *bloom* é iniciado em condição de menor estabilidade vertical permitindo que nutrientes de camadas mais profundas possam fertilizar as águas mais quentes e pobres da camada de mistura (Dandonneau e Gohin, 1984).

Estudos mais recentes foram realizados no oceano Atlântico norte (Behrenfeld 2010; Boss e Behrenfeld, 2010), demonstrando que a hipótese da profundidade crítica proposta por Sverdrup (1953) pode ser inadequada para o entendimento do *bloom* fitoplanctônico naquela região. Esses autores sugerem a hipótese da Diluição – Reconexão (Behrenfeld, 2010), focando no balanço entre crescimento fitoplanctônico e herbivoria, assim como, na variabilidade sazonal dos processos físicos que influenciam este balanço.

#### 4. Conclusões

O sensoriamento remoto da cor do oceano permite desenvolver indicadores ecossistêmicos para a zona pelágica oceânica (Platt e Sathyendranath, 2008). Desta forma, os indicadores gerados a partir de séries temporais de dados orbitais podem ser utilizados em diferentes aplicações. Neste trabalho, mostramos um exemplo no qual a fenologia do *bloom* fitoplanctônico foi caracterizada na região da Baía de Campos, RJ. Este tipo de abordagem possibilita a definição objetiva de métricas úteis para o monitoramento ambiental do ecossistema pelágico.

Os dados de CSM estimados pelo sensor orbital MODIS e analisados aqui permitiram mostrar que o máximo do *bloom* em superfície ocorre no período de inverno (mês de julho), tendo início no outono (maio). A fenologia do *bloom* fitoplanctônico na Baía de Campos foi caracterizada temporalmente. Na região do oceano Atlântico sudoeste, mais adjacente à costa brasileira, não existem relatos sobre a variabilidade interanual da duração e magnitude dos *blooms*. Estas análises merecem esforço de pesquisa adicional, uma vez que podem impactar significativamente na disponibilidade de alimento para níveis tróficos superiores. De forma similar, com o incremento das séries temporais, espera-se no futuro, poder avaliar tendências de antecipação ou atraso do *bloom*.

#### Agradecimentos

O autor agradece ao *Ocean Biology Processing Group*, do GSFC/NASA, pela produção e distribuição de dados de satélite da cor do oceano. Kampel, M. é bolsista FUNCATE-PETROBRAS/TC-0050.0066309.11.9.

## Referências Bibliográficas

- Behrenfeld, M.J., Falkowski, P.G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. **Limnology Oceanography**, v. 42, n. 1-20, 1997.
- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Siegel, D.A., McClain, C.R., Sarmiento, J.L., Feldman, G.C., Milligan, A.J., Falkowski, P.G., Letelier, R.M., Boss, E.S. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity, **Nature**, v. 444, p. 752-755, 2006.
- Behrenfeld, M.J. Abandoning Sverdrup's Critical Depth Hypothesis on phytoplankton blooms. **Ecology**, v. 91, n. 4, p. 997-1021, 2010.
- Boss, E., Behrenfeld, M.J. In situ evaluation of the initiation of the North Atlantic phytoplankton bloom. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. L18603, 2010.
- Boyce, D.G., Lewis, M.R., Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. **Nature**, v. 466, p. 591-596, 2010.
- Dandonneau, Y., Gohin, F. Meridional and seasonal variations of the sea surface chlorophyll concentration in the southwestern tropical Pacific (14 to 32°S, 160 to 175°E). **Deep-Sea Research**, v. 31, p. 1377-1393, 1984.
- Dandonneau, Y., Deschamps, P.-Y., Nicolas, J.M., Loisel, H., Blanchot, J., Montel, Y., Thieuleux, F., Bécu, G. Seasonal and interannual variability of ocean color and composition of phytoplankton communities in the North Atlantic, equatorial Pacific and South Pacific, **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 51, n. 1-3, p. 303-318, 2004.
- Falkowski, P., Scholes, R.J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J. et al. The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system. **Science**, v. 290, p. 291-296, 2000.
- Fasham, M.J.R. (ed.). **Ocean biogeochemistry: a synthesis of the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS)**. Springer-Verlag, Berlin, 2003, 238 p.
- Field, C.B.; Behrenfeld, M.J.; Randerson, J.T.; Falkowski, P. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. **Science**, v.281, p. 237-240, 1998.
- Friedrichs, M.A.M., Mary-Elena Carr, Richard T. Barber, Michele Scardi, David Antoine, Robert A. Armstrong, Ichio Asanuma, Michael J. Behrenfeld, Erik T. Buitenhuis, Fei Chai, James R. Christian, Aurea M. Ciotti, Scott C. Doney, Mark Dowell, John Dunne, Bernard Gentili, Watson Gregg, Nicolas Hoepffner, Joji Ishizaka, Takahiko Kameda, Ivan Lima, John Marra, Frédéric Mélin, J. Keith Moore, André Morel, Robert T. O'Malley, Jay O'Reilly, Vincent S. Saba, Marjorie Schmeltz, Tim J. Smyth, Jerry Tjiputra, Kirk Waters, Toby K. Westberry, Arne Winguth, Assessing the uncertainties of model estimates of primary productivity in the tropical Pacific Ocean, **Journal of Marine Systems**, v. 76, n. 1-2, p. 113-133, 2009.
- Gaeta, S.A., Metzler, P.M., Lopes, R.M. Relatório do projeto Monitoramento oceânico da Baía de Campos Fundespa/Geomap-Petrobrás: **Plâncton e Produtividade Primária na Plataforma da Costa Norte do Estado do Rio de Janeiro – Campanha de verão (Dez/91-Jan/92)**, 1993, 220 p.
- Gaeta, S.A., Metzler, P.M., Lopes, R.M. Relatório do projeto Monitoramento oceânico da Baía de Campos Fundespa/Geomap-Petrobrás: **Plâncton e Produtividade Primária na Plataforma da Costa Norte do Estado do Rio de Janeiro – Campanha de inverno (Ago/Set/92)**. 1994, 159 p.
- Gonzalez-Rodriguez, E., Valentin, J.L., André, D.L., Jacob, S.A. Upwelling and downwelling at Cabo Frio (Brazil): Comparison of biomass and primary production responses. **Journal of Plankton Research**, v. 14, n. 2, p. 289-306, 1992.
- Gregg, W.W., Conkright, M.E., Ginoux, P., O'Reilly, J.E., Casey, N.W. Ocean primary production and climate: global decadal changes. **Geophysical Research Letters**, v. 30, p. 1809, 2003.



- Henson, S. A., Dunne, J. P., Sarmiento, J. L. Decadal variability in North Atlantic phytoplankton blooms, **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. C04013, 2009.
- Kahru, M., Brotas, V., Manzano-Sarabia, M., Mitchell, B. G. Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic?. **Global Change Biology**, v. 17, p. 1733–1739, 2011.
- 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. 279 p. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 2003.
- Kampel, M., Gaeta, S.A., Lorenzetti, J.A., Pompeu, M. Satellite estimates of chlorophyll-*a* concentration in the Brazilian Southeastern continental shelf and slope waters, southwestern Atlantic. **Proc. SPIE 6680**, Coastal Ocean Remote Sensing, 668012-1, 2007.
- Kampel M., Lorenzetti J.A., Bentz C.M., Nunes R.A., Paranhos R., Rudorff F.M., Politano A.T. 2009a. Simultaneous Measurements of Chlorophyll Concentration by Lidar, Fluorometry, above-Water Radiometry, and Ocean Color MODIS Images in the Southwestern Atlantic, **Sensors**, v. 9, n. 1, p. 528-541, 2009.
- Kampel, M., Lorenzetti, J.A., Bentz, C.M., Gaeta, S.A. 2009b. Comparação de dados SeaWiFS e MODIS para a região da Bacia de Campos, RJ. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos, INPE, Artigos, p. 1111-1118. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://mar.te.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.19.14.43/doc/1111-1118.pdf>>. Acesso em 10 jul. 2012.
- 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.
- Martinez, E., Antoine, D., D'Ortenzio, F., Gentili, B. Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton. **Science**, v. 326, n. 5957, p. 1253–1256, 2009.
- Morel, A., Huot, Y., Gentili, B., Werdell, P.J., Hooker, S.B., Franz, B.A. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach, **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 1, p. 69-88, 2007.
- Moser, G.A.O., Giancesella-Galvão, S.M.F. Biological and oceanographic upwelling indicators at Cabo Frio (RJ). **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 45, n. 1-2, p. 11-23, 1997.
- Navarro, G., Caballero, I., Prieto, L., Vázquez, A., Flecha, S., Huertas, I.E., Ruiz, J. Seasonal-to-interannual variability of chlorophyll-*a* bloom timing associated with physical forcing in the Gulf of Cádiz, **Advances in Space Research**, v. 50, n. 8, p. 1164-1172, 2012.
- O'Reilly, J. E., Maritorena, S., Mitchell, B. G., Siegel, D. A., Cardel, K. L., Garver, S. A., et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, v. 103, n. C11, p. 24937–24953, 1998.
- Platt, T., White III, G.N., Zhai, L., Sathyendranath, S., Roy, S. The phenology of phytoplankton blooms: Ecosystem indicators from remote sensing, **Ecological Modelling**, v. 220, n. 21, p. 3057-3069, 2008.
- Platt, T., Sathyendranath, S. Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean from remote sensing, **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 8, p. 3426-3436, 2008.
- Platt, T., Fuentes-Yaco, C., Frank, K. T. Spring algal bloom and larval fish survival. **Nature**, v. 423, p. 398–399, 2003.
- Platt, T., Sathyendranath, S. Oceanic primary production: estimation by remote sensing at local and regional scale. **Science**, v. 241, p. 1613–1620, 1988.
- Rey, F., Skjoldal, H.R., Slagstad, D. Primary production in relation to climate changes in the Barents Sea. In: Loeng Bergen, H. (Ed.). **The effect of oceanographic conditions on distribution and population dynamics of commercial fish stocks in the Barents Sea**. Institute of Marine Research, p. 29-46, 1987.

Siegel, D.A., Doney, S.C., Yoder, J.A. The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's Critical Depth Hypothesis. **Science**, v. 296, p. 730–733, 2002.

Sverdrup, H.U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. **Journal du Conseil Permanent International Pour L'Exploration de la Mer**, v. 18, p. 287–295, 1953.