

Variabilidade temporal da concentração de clorofila-a e de calcita na região da quebra de plataforma Argentina, através do sensor MODIS/Aqua

Amábile Ferreira^{1,2}
Carlos Alberto Eiras Garcia^{1,3}
Virgínia Maria Tavano Garcia^{1,4}

¹Universidade Federal de Rio Grande – FURG
Av. Itália, Km 8 - Rio Grande - RS, Brasil

²amabilefr@hotmail.com

³dfsgar@furg.br

⁴docvmtg@furg.br

Abstract. Ocean color images from the Patagonia shelf break in the Southwestern Atlantic Ocean usually exhibit high phytoplankton biomass during spring and summer periods, associated with a front between shelf subantarctic platform waters and the Malvinas Current. After nutrient depletion from the diatom-dominated spring bloom, a coccolithophore bloom begins in November, anticipating moderated chlorophyll-a values in the ending summer. In this work, the timing and duration of blooms were analyzed using time series of chlorophyll-a and calcite (a proxy for coccolithophore blooms), derived from remote sensing data (MODIS/Aqua). These analyses reflected the temporal variation of chlorophyll-a concentration, consistent with phytoplankton abundance and identification from several cruises conducted in the region. Specifically, the image analyses of calcite concentration allowed detection of an important temporal and spatial pattern in the development of coccolithophore blooms over the Patagonia shelf and slope region. The latitudinal variation of the bloom intensity and its development indicates a relation to hydrographic conditions and nutrient input from upwelling at the shelf-break front and advection from the Malvinas Current. The development of more accurate bio-optical algorithms to derive the concentration of variables associated with blooms (primarily chlorophyll-a, calcite, and other products not evaluated here) will allow the continuous monitoring of features in the region through remote sensing.

Palavras-chave: cor do oceano, quebra da plataforma Argentina, floração do fitoplâncton, floração de coccolitoforídeos, ocean color, Patagonian shelf break, phytoplankton bloom, coccolithophores bloom.

1. Introdução

Na proximidade do talude na costa Argentina, as águas costeiras subantárticas encontram as águas mais frias, mais salinas e ricas em macronutrientes da Corrente das Malvinas (CM), produzindo uma frente termohalina, a frente da quebra de plataforma. Rivas *et al.* (2006), através de médias climatológicas mensais de imagens do sensor *SeaWiFS*, apresentaram a evolução sazonal de concentração de clorofila-a na plataforma interna e externa da Patagônia. Nas águas ricas da CM, fortemente turbulentas, a produção fitoplanctônica é limitada pela mistura profunda, apresentando baixas concentrações do pigmento (Saraceno *et al.*, 2005). Na quebra de plataforma, os níveis de biomassa se elevam a partir de setembro, caracterizando a floração de primavera, com níveis relativamente elevados até março (Romero *et al.*, 2006; Rivas *et al.*, 2006). Segundo a descrição dos últimos, dois processos levam a interpretar os altos níveis de biomassa na quebra de plataforma: (1) o desenvolvimento da termoclina sazonal, que mantém as águas superficiais adequadamente iluminadas e (2) o suprimento de nutrientes da frente da quebra de plataforma (ver também Garcia *et al.*, 2008). Visto que as elevadas concentrações do fitoplâncton normalmente não se estendem mais ao norte do ponto máximo alcançado pela Corrente das Malvinas (~39°S), os autores atribuem à frente termal a formação das florações. Estudos anteriores com imagens de satélite sugeriram que estas florações, tanto na plataforma quanto no talude, são dominadas por coccolitoforídeos (Brown e Yoder, 1994), um grupo de microalgas fitoplanctônicas que possuem carapaças de carbonato de cálcio (ou calcita). Contudo, séries temporais de imagens

mais atuais do sensor *SeaWiFs* evidenciaram que os picos de concentração de clorofila-a antecedem aos picos de calcita, verificando a dominância dos cocolitoforídeos somente entre dezembro e fevereiro (Signorini *et al.*, 2006).

Sob responsabilidade do Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL) que integra o Programa Antártico Brasileiro, o projeto PATEX (*PATagonian EXperiment*) tem como objetivo investigar os processos físicos e biogeoquímicos associados com a ocorrência das florações de fitoplâncton na plataforma e talude da Patagônia, através de uma série de cruzeiros oceanográficos, realizados desde 2004. As amostragens *in situ*, que são baseadas em análises prévias das imagens de satélite (clorofila-a e calcita), vem sendo realizadas em diferentes períodos de primavera e verão, permitindo análises da intensidade destas florações e fatores associados, bem como a constatação de mudanças sazonais nos grupos funcionais do fitoplâncton. A associação dos dados *in situ* com as imagens de satélite permitirá um melhor entendimento das florações e dos processos biogeoquímicos associados na região, bem como o desenvolvimento de modelos bio-óticos para seu monitoramento.

O objetivo do presente trabalho foi caracterizar a variabilidade temporal das concentrações de clorofila-a e de calcita na região da costa da Patagônia por sensoriamento remoto, através de imagens do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)/Aqua.

2. Material e Métodos

Imagens semanais e mensais globais do sensor MODIS/Aqua de concentração de clorofila-a e de calcita com resolução espacial de 4 km, correspondentes ao período de julho de 2002 a junho de 2008 (276 semanas e 72 meses), foram adquiridas do arquivo disponível pela NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>). Estas imagens são representações de produtos de dados binários, como arquivos "*Level 3 Standard Mapped Image (SMI)*", após processamento nº 4. Todos os procedimentos que seguem foram realizados em ambiente MATLAB®. As imagens originais (globais) foram recortadas em sub-imagens correspondentes à região de interesse, com coordenadas 34-52 °S e 52-64 °W. Os números digitais foram convertidos em valores logaritmos de concentração, após aplicação do algoritmo empírico OC3M (O'Reilly *et al.*, 2000) no caso da clorofila (mg m^{-3}), e do algoritmo desenvolvido por Gordon e Balch (1999) para estimativa de concentração de calcita (mol m^{-3}). Aos pixels correspondentes às nuvens e terra foram atribuídos valores não numéricos, não sendo considerados nas análises. Obtêve-se, assim, séries temporais de médias semanais e mensais referente ao período de seis anos, para cada pixel da área avaliada.

Um padrão anual foi evidenciado para uma grande faixa de pixels com ausência total de dados nas imagens médias de concentração de clorofila-a, da forma: em abril a sul de 48 °S, com uma maior abrangência no mês de maio, se estendendo até 43 °S, e distribuição intermediária no mês de junho, atingindo 46 °S. Na seqüência, apenas os pixels não válidos nas imagens do mês de julho apresentaram uma distribuição aparentemente representativa de nuvens ou de ausência de luz, que estiveram em torno da latitude 52 °S. No caso das imagens de calcita, a faixa com ausência de dados se estendeu em grande parte da área considerada, até a latitude 44 °S.

Na série temporal de dados mensais de cada pixel, procedeu-se um ajuste não linear, aplicando-se um modelo cossenoidal, a fim de analisar o sinal de periodicidade anual (ver Garcia *et al.*, 2004). Este método constitui um procedimento de mínimos quadrados para modelar as anomalias (variação em torno da média referente a todo período analisado) das médias mensais das duas variáveis analisadas. Para tanto, os valores médios computados em cada pixel ao longo dos seis anos foram subtraídos da série temporal correspondente para

obtenção dos espectros de anomalia do período. Sobre cada um destes, foi então ajustado o modelo baseado na equação: $y_i = a_j \cdot \cos(2 \cdot \pi / T) \cdot (t - f_j)$, onde 'a_j' é a amplitude da função cosenoidal, 'f_j' é a fase; 'T' é o período (12 meses), 't' varia de 1 a 72 meses (julho/2002 a junho/2008) e j representa cada pixel. Foi calculado o coeficiente de determinação (r²) para o intervalo temporal de cada pixel para verificar, em porcentagem, o quanto da variância total dos dados é explicada pelo modelo proposto. A função só foi ajustada aos pixels que apresentaram mais de 80% de dados válidos ao longo do intervalo considerado. Quando não foi o caso de obtenção de um valor de r² > 0,4, os pixels foram descartados para a construção das imagens dos valores obtidos pela modelagem (amplitude e r²).

As imagens semanais foram utilizadas para a confecção de diagramas Hovmoller, a fim de analisar, com maior resolução temporal, a evolução das florações ao longo da quebra de plataforma.

3. Resultados e Discussão

Variabilidade mensal das florações

Através das imagens mensais médias de concentração de clorofila-a, verifica-se floração intensa sobre grande área da plataforma continental e talude em setembro e outubro (Fig. 1). Em novembro, as concentrações diminuem drasticamente e, a partir de dezembro, a faixa com altas concentrações associada à quebra de plataforma se torna bem definida em relação às regiões em torno, com diminuição progressiva nos meses seguintes. Como já constatado *in situ*, as florações de primavera na região são dominadas por grandes diatomáceas e dinoflagelados (Garcia *et al.*, 2008), com persistência de menores valores relativos de concentração de clorofila-a até o verão tardio, quando ocorre exaustão de nutrientes e dominância de pequenos nanoflagelados (Comin *et al.*, 2008).

As concentrações de calcita se elevam a partir de outubro apenas em áreas da plataforma continental e a leste do talude argentino (Fig. 2). Em novembro, alto sinal referente à calcita é evidente mais ao sul, atingindo toda a região da frente em dezembro. Em janeiro, concentrações intermediárias ainda delimitam a região do talude, diminuindo de forma acentuada no mês seguinte. A floração de cocolitoforídeos na região da plataforma foi constatada, *in situ*, através de um cruzeiro realizado em janeiro/2008, que buscou a ocupação dos pontos com altas concentrações de calcita, evidenciados pelo sensor MODIS. Apesar das altas concentrações relativas de CaCO₃, os valores de biomassa (clorofila-a) a estas microalgas associadas não ultrapassaram 1,5 mg m⁻³ (Araujo *et al.*, 2008). Desta forma, a presença do grupo sucede a floração de primavera na região, como descrito por Signorini *et al.* (2006) e sugerido por Garcia *et al.* (2008), antecedendo a persistência de valores moderados de concentração de clorofila-a até o verão tardio, provavelmente como resultado de processos de regeneração local de nutrientes.

Como discutido pelos mesmos autores, baixos níveis de nutrientes após a alta produção de biomassa durante a primavera, associados a altos índices de intensidade luminosa e intensa estratificação são os fatores determinantes para o desenvolvimento de florações dos cocolitoforídeos, explicação para o padrão temporal das florações aqui verificado (Fig. 2).

Vale ressaltar que a inferência quantitativa da biomassa dos cocolitoforídeos através das concentrações de calcita indicadas pelas imagens de satélite apresenta altos graus de incerteza, dada a problemática decorrente dos algoritmos padrão utilizados pela NASA. Isto, em menor grau, também é válido para a concentração de clorofila-a, embora possa ser importante nos períodos de presença deste grupo, visto que altos valores de reflectância resultantes do alto grau de retro-espalhamento da luz promovida pelas suas carapaças de CaCO₃ é uma importante causa de erros na aplicação de modelagem empírica (Gordon *et al.*, 2001). O desenvolvimento de algoritmos bio-óticos que permitam estimativas mais acuradas

das variáveis biogeoquímicas associadas às florações é objetivo do estudo que vem sendo realizado na região.

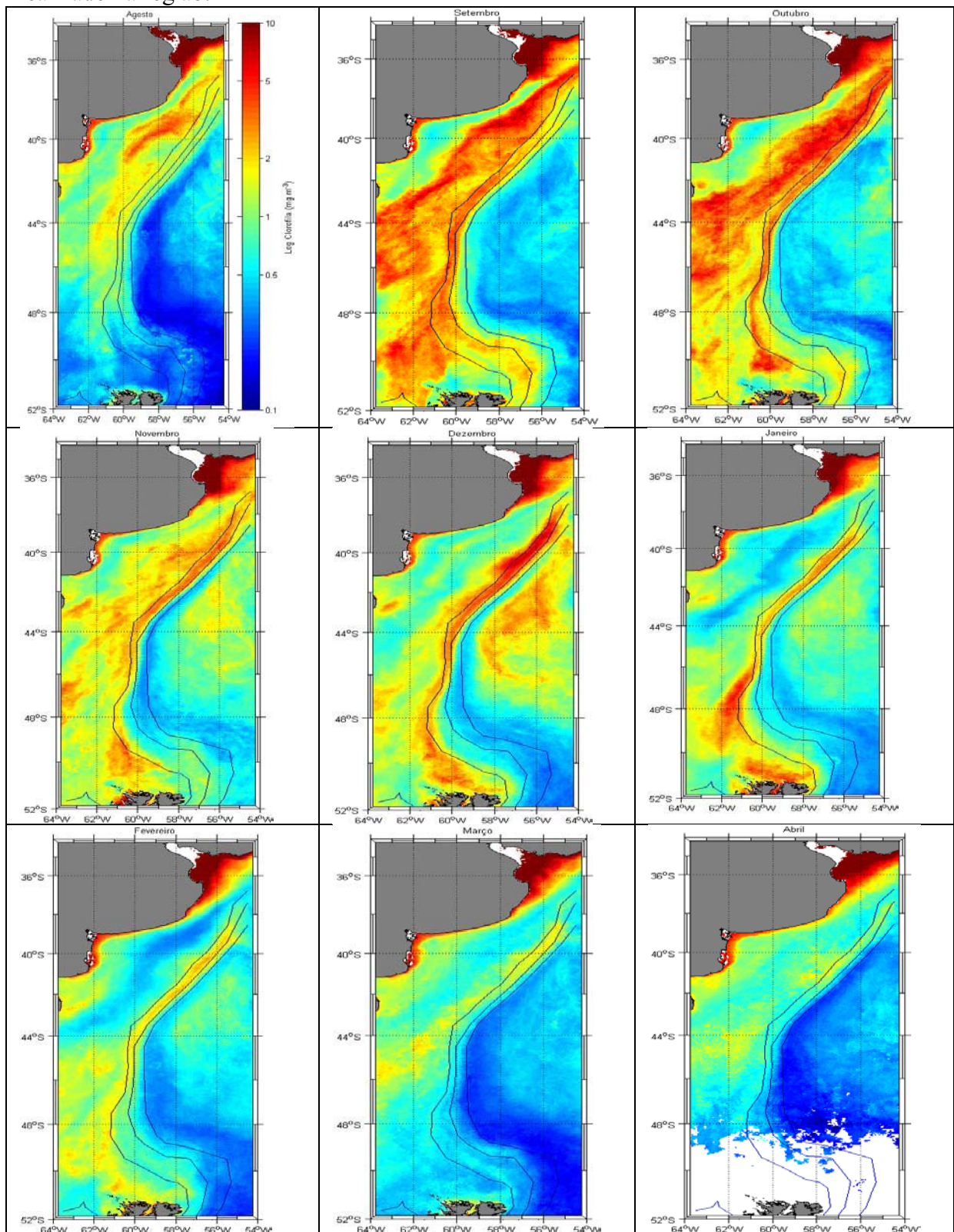


Figura 1 – Imagens médias dos meses com maiores concentrações de clorofila-a, estimadas pelo sensor MODIS, no período de julho de 2002 a junho de 2008.

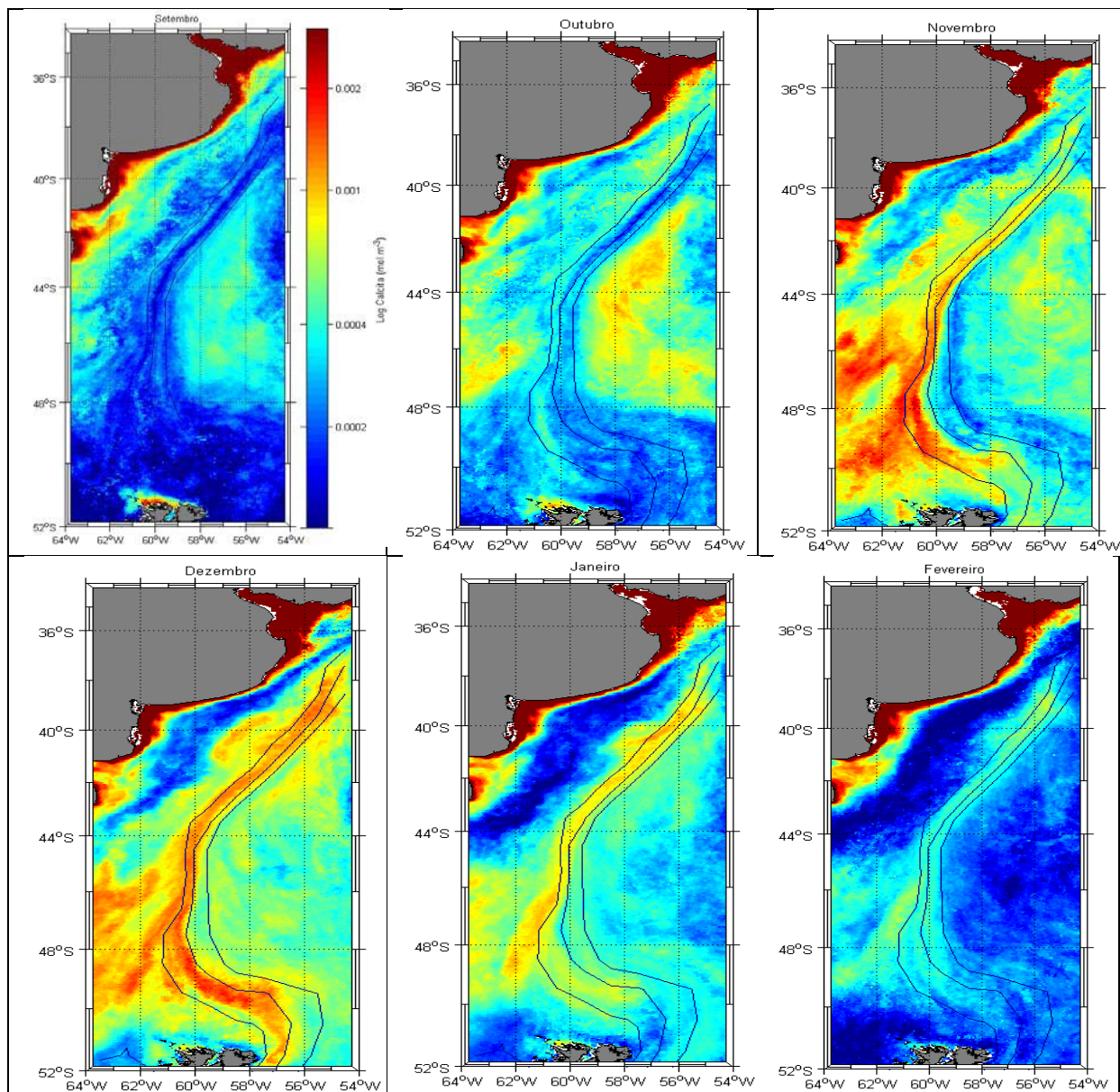


Figura 2 – Imagens médias dos meses com maiores concentrações de calcita, estimadas pelo sensor MODIS, do período de julho de 2002 a junho de 2008.

Ajuste do modelo periódico anual

As imagens de amplitudes de concentração produzidas a partir do ajuste do modelo periódico anual sobre cada série temporal da anomalia de concentração de clorofila-a e de calcita estão apresentadas na Figura 3 e refletem a evolução temporal já vista nas Figs. 1 e 2. A ausência de valores (áreas brancas) corresponde aos pixels nos quais o ajuste foi realizado, mas apresentou r^2 menor que 0.4. A faixa branca delimitada mais ao sul corresponde à ausência de dados nos períodos de inverno, o que não permitiu um ajuste confiável estatisticamente, não sendo portanto considerada. No caso da calcita, a faixa correspondeu à grande parte da área analisada, prejudicando de forma importante a análise espacial do sinal de periodicidade. Ainda assim, é evidente forte ciclo anual na região de quebra da plataforma para ambas as variáveis e, no caso da clorofila-a, este é constatado ao longo de toda a frente. Também, nota-se ciclo anual bem definido a leste da quebra de plataforma, sendo que a banda estreita com ausência de valores entre as áreas indica a inexistência de um ciclo anual na Corrente das Malvinas. Ao contrário, é evidente a ocorrência de sinal periódico anual da

concentração de calcita na faixa correspondente à Corrente das Malvinas. A Figura 4 apresenta as imagens correspondentes aos valores de r^2 obtidos através do ajuste do modelo, indicando altos coeficientes na região do talude argentino, tendo destaque a altos valores também na região de oceano aberto.

Variação espacial e temporal das florações

O diagrama Hovmoller latitudinal indica a propagação das altas concentrações de clorofila-a de norte para o sul, com exceção dos anos de 2002 e 2006 (Fig. 5). Tal fato estaria associado com diferenças no tempo de início da estratificação das águas, condição para o início das florações, que ocorre inicialmente mais ao norte (Rivas *et al.*, 2006). Apesar do padrão, a intensidade e duração das florações também apresentam variabilidade interanual (Fig. 5). A progressão sazonal dos parâmetros físicos e biogeoquímicos determinantes para o desenvolvimento dos coccolitoforídeos na região foi analisada por Signorini *et al.* (2006). Contudo, os autores apresentaram médias para toda a quebra de plataforma, não apresentando variações dos parâmetros ao longo da região.

Nossa análise da evolução temporal e espacial indica a tendência contrária (em relação à de clorofila-a) de propagação de altas concentrações de calcita do sul para o norte, bem como a ocorrência de altos valores primeiramente sobre a plataforma, como já sugerido pelas imagens mensais da mesma (Fig. 2). Isso pode refletir a escassez de nutrientes nestas áreas após a floração intensa de primavera, nas quais a reposição de nutrientes pela Corrente das Malvinas é menos provável, bem como a estratificação é mais intensa, em relação ao talude. A ocorrência posterior de altos valores de calcita ao longo de toda a área a leste da quebra de plataforma (correspondente à Corrente das Malvinas), não foi verificada no caso da concentração de clorofila-a. Embora a Corrente das Malvinas apresente um grau elevado de turbulência (em princípio desfavorável aos coccolitoforídeos), a provável limitação por ferro (Garcia *et al.* 2008) deve também impedir o desenvolvimento de outros grupos, como diatomáceas. Assim, esses grupos de menor tamanho e com estratégias de crescimento mais rápido podem se desenvolver.

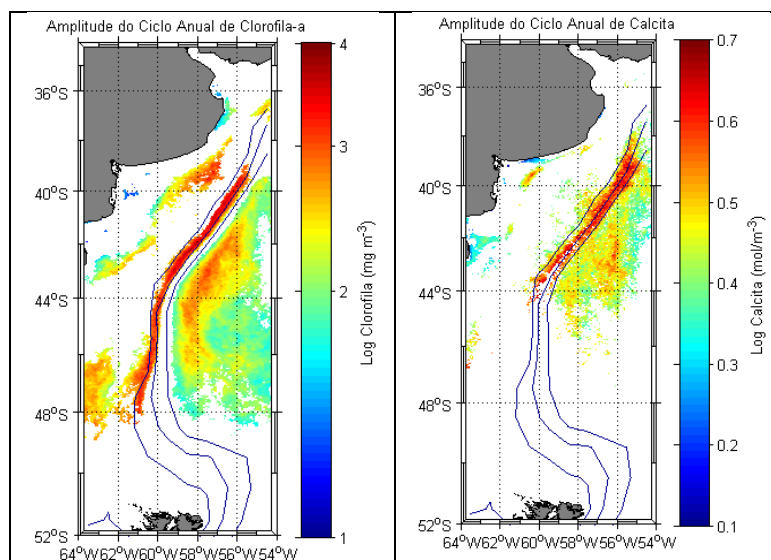


Figura 3 – Imagens dos valores de amplitude de concentração de clorofila-a (em mg m^{-3} , esquerda) e de calcita (em mol m^{-3} , direita) computados pelo ajuste do modelo de ciclo anual para as séries temporais de concentração obtida pelo sensor MODIS, do período de julho de 2002 a junho de 2008. As áreas em branco indicam os pixels que não apresentaram a condição de no mínimo 80% de dados válidos ao longo da série temporal de 72 meses, principalmente nas maiores latitudes, bem como os pixels nos quais o ajuste do modelo foi realizado, porém fornecendo um r^2 menor do que 0.4.

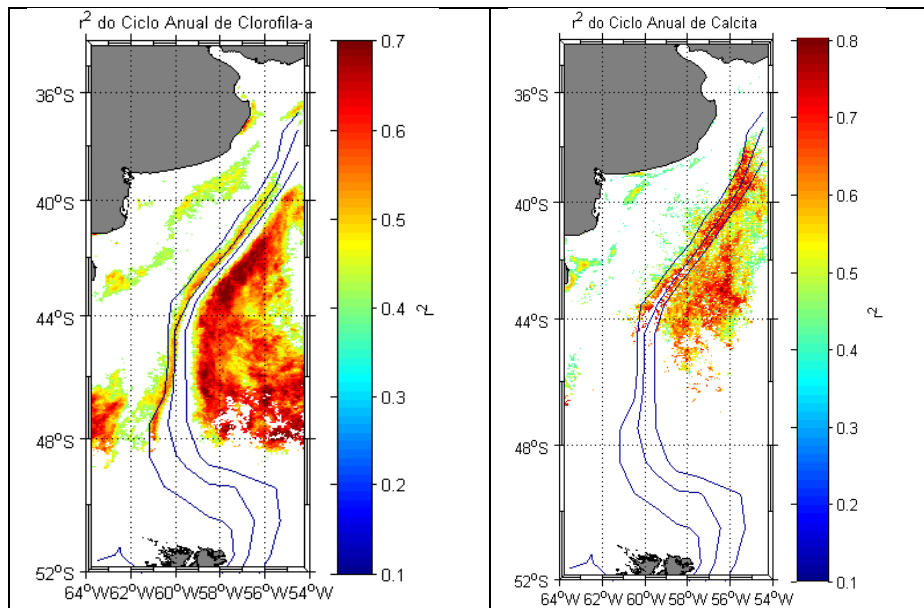


Figura 4 – Imagens dos coeficientes de determinação (r^2) computados com o ajuste do modelo de ciclo anual sobre as séries temporais de concentração de clorofila-a (esquerda) e de calcita (direita), obtidas pelo sensor MODIS, do período de julho de 2002 a junho de 2008. As áreas em branco correspondem às mesmas da Figura 3.

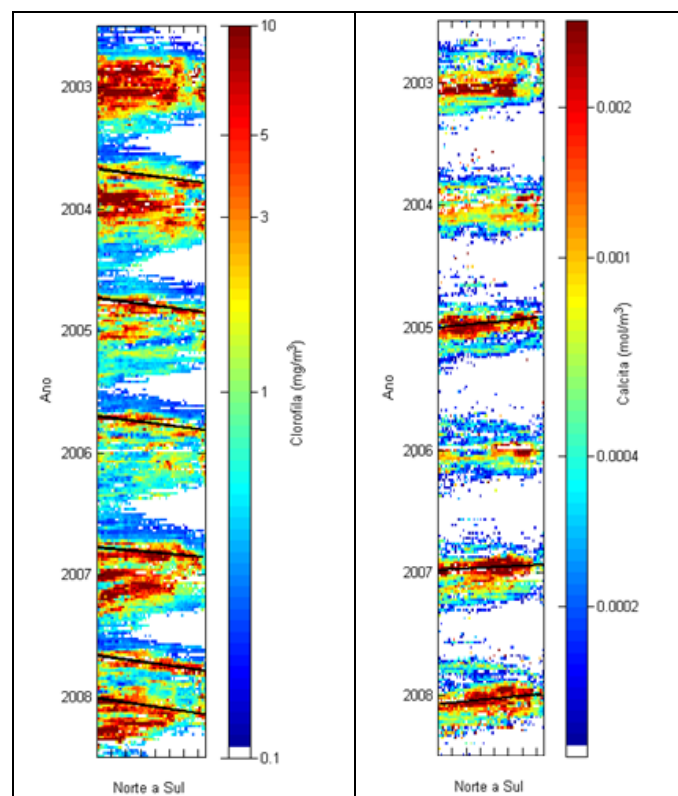


Figura 5 - Diagramas Hovmoller referente a pontos de norte a sul (eixo horizontal), ao longo da quebra da plataforma Argentina, de concentração de clorofila-a (esquerda) e de calcita (direita). A série temporal (eixo vertical) corresponde às imagens semanais do período de julho de 2002 a junho de 2008. As áreas brancas correspondem aos pixels com ausência de dados durante os períodos de inverno e, no caso da calcita, também a concentrações muito baixas. As linhas em preto indicam a direção da tendência de propagação latitudinal das florações.

4. Conclusões

A utilização das imagens de satélite da cor do oceano e de produtos derivados é uma ferramenta fundamental para o estudo da intensidade e duração das florações do fitoplâncton que ocorrem na região da costa e talude Argentino, em primavera e verão de cada ano. A análise temporal e espacial das imagens de concentração de clorofila-a e de calcita, associada às informações dos fatores determinantes (nutrientes e condições da coluna d'água) permite o entendimento da formação e do desenvolvimento destas florações, bem como das suas mudanças em grupos funcionais, já constatadas *in situ*. A análise das imagens derivadas pelo sensor MODIS refletiram a variação temporal relativa da concentração de clorofila-a, condizente com análises de concentração e de identificação dos grupos fitoplanctônicos em cruzeiros realizados na região. Particularmente, a análise das imagens de concentração de calcita permitiu a verificação de um importante padrão temporal e espacial no desenvolvimento das florações dos coccolitoforídeos, que aparentemente iniciam e se propagam de sul para norte, ao contrário do padrão geral da biomassa fitoplanctônica. A variação latitudinal da intensidade e de seu desenvolvimento indica relação com as condições hidrográficas e concentrações dos diferentes nutrientes carregados pela Corrente das Malvinas. O desenvolvimento de algoritmos bio-óticos mais robustos para derivar a concentração de variáveis associadas às florações (principalmente clorofila-a, calcita, além de outros produtos aqui não avaliados) permitirá o monitoramento contínuo da evolução das florações na região através do sensoriamento remoto.

Referências Bibliográficas

- Araujo, R. G.; Ferreira, A.; Garcia, V. M. T. Distribuição da biomassa fitoplanctônica na plataforma da Patagônia, durante ocorrência de coccolitoforídeos. In: Simpósio Brasileiro sobre Pesquisa Antártica (SPA), 16, 2008, São Paulo. **Anais do XVI Simpósio sobre Pesquisa Antártica**, São Paulo: USP, 2008. Disponível em: <<http://www2.igc.usp.br/cpa/PAINEIS%20XVI%20SPA.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2008.
- Brown, C. W.; Balch, H. M. MODIS Detached Coccolith Concentration Algorithm Theoretical Basis Document, Version 4, **Algorithm Theoretical Basis Document (NASA)**, 1999.
- Brown, C. W.; Yoder, J. A. Coccolithophorid blooms in the global ocean, **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 7467-7482, 1994.
- Comin R.; Garcia, V. M. T.; Ferreira, A. Estimativas de biomassa fitoplanctônica no talude da Patagônia, com base em clorofila-a fracionada e microscopia. In: Simpósio Brasileiro sobre Pesquisa Antártica (SPA), 16, 2008, São Paulo. **Anais do XVI Simpósio sobre Pesquisa Antártica**, São Paulo: USP, 2008. Disponível em: <<http://www2.igc.usp.br/cpa/PAINEIS%20XVI%20SPA.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2008.
- Garcia, V.M.T.; Garcia, C.A.E.; Mata, M.M.; Pollery, R.C.; Piola, A.R.; Signorini, S.; McClain, C.R.; Environmental factors controlling the phytoplankton blooms at the Patagonia shelf-break in spring. **Deep-Sea Research Part I**, v. 55, 1150-1166, 2008.
- Garcia, C.A.E.; Sarma, Y.V.B.; Mata, M.M.; Garcia, V.M.T. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil–Malvinas Confluence region. **Deep-Sea Research Part II**, v. 51, p.159–172, 2004.
- Gordon, H.R.; Boynton, G.C.; Balch, W.M.; Groom, S.B.; Harbour, D.S.; Smyth, T.J. Retrieval of coccolithophore calcite concentration from SeaWiFS imagery. **Geophysical Research Letters**, v. 28, p. 1587–1590, 2001.
- O'Reilly, J.; Maritorena, S.; Mitchell, B.G.; Siegel, D.; Carder, K.L.; Garver, S.; Kahru, M.; McClain, C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, 24937-24953, 2000.
- Rivas A.L.; Dogliotti A.I.; Gagliardini D.A. Seasonal variability in satellite-measured surface chlorophyll in the Patagonian Shelf. **Continental Shelf Research**, v. 26, p. 703-720, 2006.
- Romero, S.I.; Piola A.R.; M. Charo Y.; Garcia, C.A.E. Chlorophyll-a variability off Patagonia based on SeaWiFS data. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, C05021, doi:10.1029/2005JC003244, 2006.
- Saraceno M.; Provost C.; Piola A.R. On the relationship between satellite retrieved surface temperature fronts and chlorophyll-a in the Western South Atlantic, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, C11016, doi:10.1029/2004JC002736, 2005.
- Signorini, S.R., Garcia, V.M.T., Piola, A.R., Garcia, C.A.E., Mata, M.M., McClain, C.R., Seasonal and interannual variability of coccolithophore blooms in the vicinity of the Patagonian shelf break (38°S – 52°S). **Geophysical Research Letters**, v. 33, L16610, doi:10.1029/2006GL026592, 2006.