

Anomalias da concentração de clorofila estimadas pelo sensor MODIS/Aqua no oceano Atlântico Sudoeste no período 2002-2016

Luis Henrique Polido de Souza
Carlos Alberto Eiras Garcia
Ricardo Cechet

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/PPGOCEANO
Caixa Postal – 88.040-900 – Florianópolis – SC, Brasil
{lhpolido, garcia.io.furg}@gmail.com
ricardocechet@hotmail.com

Abstract.

The present article brings spatial-temporal analyses at monthly and seasonal time scales from the 15-year time series (2002-2016) of ocean color remote sensing chlorophyll-a images from MODIS/NASA sensor in the Southwestern Atlantic Ocean. Mean and standard deviation of chlorophyll images have shown the distribution patterns already discussed in several works in the study area. On the other hand, analysis of monthly anomaly images showed that the austral winter of 2016 presented the most intense positive anomaly of chlorophyll-a in the last 15 years. Superficial currents data from OSCAR project were used to demonstrate that the austral winter of 2016 was strongly influenced by anomalous strong coastal currents flowing northward. We suggest this was responsible to bring nutrient-rich water from higher latitudes to explain the exceptional increase in phytoplankton biomass on the South Brazilian Continental Shelf during austral winter of 2016 as observed by satellite images.

Palavras-chave: Remote Sensing of Oceans, Chlorophyll-a, Southwestern Atlantic Ocean, Sensoriamento Remoto dos Oceanos, Clorofila-a, Oceano Atlântico Sudoeste

1. Introdução

O Atlântico Sudoeste é influenciado por duas correntes de contorno oeste, denominadas de Corrente do Brasil (CB) e Correntes das Malvinas. Enquanto a CB flui para o sul, a CM flui para o norte até ambas alcançarem a região da Confluência Brasil-Malvinas (CBM), que ocorre ao redor de 38°S. A CB é responsável por transportar a massa de Água Tropical (AT) nas camadas superiores (Silveira et al., 2000). A AT possui baixa concentração de nutrientes, temperaturas maiores que 20°C e salinidades superiores a 36. Ao fluir para S/SW, a CB encontra águas provenientes de aportes continentais com baixa salinidade, ricas em nutrientes e geralmente mais frias no inverno (Silveira et al., 2000).

A extensão das águas costeiras sobre a plataforma continental sul brasileira (PCSB) é controlada predominantemente pelo Rio La Plata (35°S e 55°W) durante o inverno e outono, época em que a pluviosidade aumenta e os ventos de S/SW acentuam-se com o deslocamento da pluma do Rio La Plata para o norte (Piola et al, 2008). Möller et al. (2008) sugeriram que a pluma do Rio La Plata pode alcançar até 1000 Km de sua desembocadura em direção norte em condições específicas de pluviosidade e ventos. No verão, entretanto, ventos de nordestes alteram esse padrão mantendo a pluma mais próxima da desembocadura do La Plata (Piola et al., 2008). O sistema lagunar da Lagoa dos Patos (30°S e 34°S) também apresenta um importante papel no aporte de águas continentais para a PCSB contribuindo para o aumento do nível da clorofila em aproximadamente 130 km, em direção ao talude continental, durante os eventos de *El-Niño Southern Oscillation* (ENSO) (Ciotti et al., 1995). As mudanças sazonais e/ou interanuais das descargas dos aportes continentais e dos ventos influenciam diretamente na distribuição da concentração de clorofila na região (Garcia e Garcia, 2008).

A Água Central do Atlântico Sul (ACAS), que se encontra abaixo da AT, pode aflorar em algumas áreas ao longo da costa como resultado da ressurgência costeira, variando desde o paralelo 22°S até o 29°S, englobando assim as ressurgências de São Tomé (RJ), Cabo Frio (RJ), São Vicente (SP) e Cabo do Santa Marta Grande (SC) (Silveira et al., 2000). Essas regiões,

majoritariamente na primavera e verão com vento predominante de nordeste, tornam as águas mais produtivas com a ocorrência de *blooms* de curta duração e baixa intensidade, porém de grande importância no aspecto ecológico em um oceano oligotrófico como no caso do Atlântico Sudoeste (Acha et al., 2004).

O uso de dados orbitais pode ajudar a identificar eventos esporádicos e de grandes intensidades da concentração de clorofila, entretanto, para as regiões costeiras os algoritmos globais da clorofila-a apresentam uma baixa acurácia na região adjacente ao Rio La Plata, devido à interferência do material particulado proveniente do aporte continental (Garcia et al, 2005).

O presente estudo tem como objetivo analisar uma série histórica de 15 anos de imagens da cor do oceano providas pelo sensor MODIS/Aqua, entre as latitudes 24 e 40°S - Atlântico Sudoeste, a fim de enfatizar os eventos anômalos de concentração de clorofila por satélites (CSAT) na série temporal, em escalas mensal e sazonal. Correntes superficiais derivadas pelos altímetros, ventos e campo da temperatura superficial do mar providos pelo sensoriamento remoto serão utilizados para explicar os eventos de grandes anomalias.

2. Materiais e Métodos

A área de estudo compreende as latitudes 24 - 40°S e longitudes 39 - 60°W, que correspondem a área desde a desembocadura do Rio La Plata até a Ilha de São Sebastião – Atlântico Sudoeste (Figura 1). Para a investigação das anomalias da concentração de clorofila-a (CSAT), utilizou-se uma série temporal de 15 anos de dados da cor do oceano, de julho de 2002 até agosto de 2016, totalizando um conjunto de 170 imagens provenientes do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite Aqua.

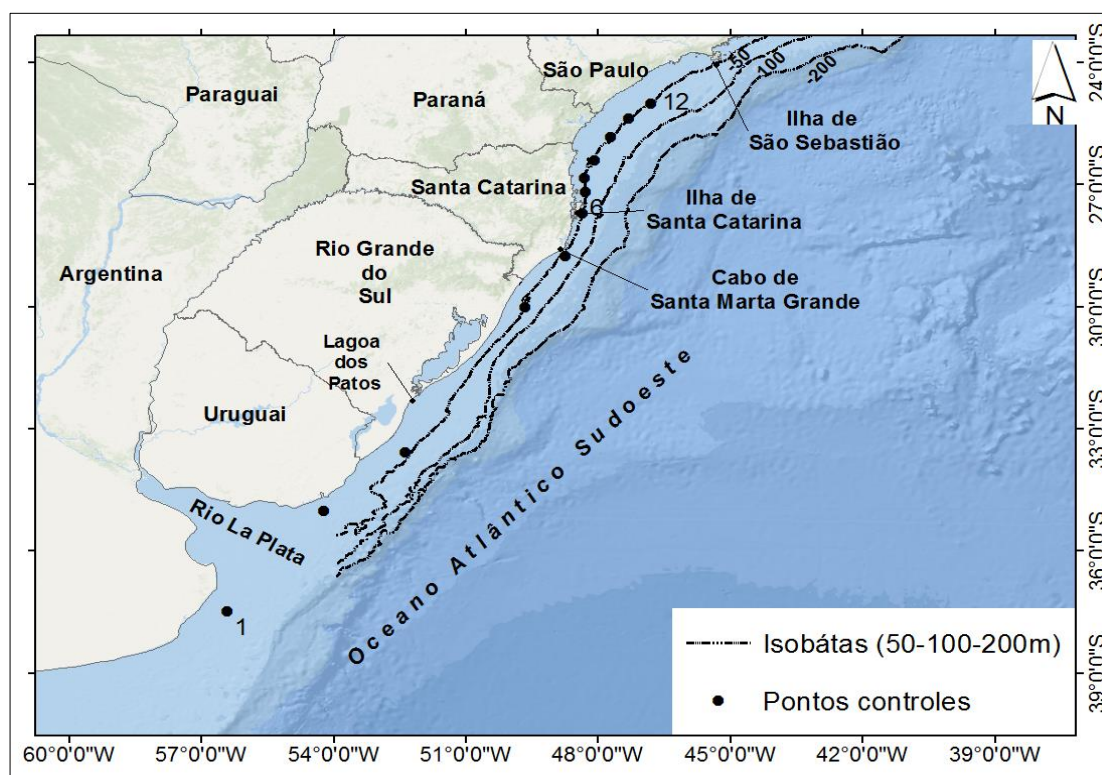


Figura 1: Área de estudo. As isobatas de 200, 100 e 50 m (em linhas tracejadas) e os 12 pontos de controle onde serão analisados a variabilidade da CSAT são mostradas na figura.

As imagens correspondem aos campos das médias mensais da CSAT, processadas e disponibilizadas no nível L3, *Standard Mapped Images* (SMI) em formato *netcdf, com resolução espacial de 4 km x 4 Km e projetadas de forma cilíndrica equidistante (*Plate Carrée*). As imagens foram obtidas no endereço eletrônico <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. Os dados mensais de CSAT foram transformados em escala logarítmica e agrupados de forma sazonal (Tabela 1). Posteriormente, análises estatísticas básicas (média e desvio padrão) foram realizadas para cada pixel das séries mensais e sazonais.

Tabela 1: Agrupamento das imagens mensais por sazonalidade.

Estações	Meses	Anos
Inverno	Jun./Jul./Ago	2002 até 2016
Primavera	Set./Out./Nov.	2002 até 2015
Verão	Dez./Jan./Fev.	2002 até 2015
Outono	Mar./Abr./Maio	2003 até 2016

Em seguida, os valores da CSAT mensais foram subtraídos pela média climatológica, operação que resultou nas anomalias da concentração de clorofila (ACSAT). As regiões onde os valores numéricos eram representados por nuvens foram interpoladas de forma linear no espaço e no tempo. Os pixels com nuvens não representaram 11 % do número total de pixels das imagens.

Sobre a isóbata de 50 m, entre as latitudes 39°S e 40°S, foram selecionadas 12 localidades (pontos de controle) para investigar pontualmente a evolução das ACSAT na série histórica de resolução mensal. Os meses que possuíam os maiores valores de anomalias foram representados em imagens a fim de representar espacialmente o evento.

Correntes superficiais derivadas do projeto OSCAR (*Ocean Surface Current Analyses Real-time*) (OSCAR, 2009), disponível em www.esr.org/oscar, foram utilizadas para explicar a variabilidade da ACSAT em seções perpendiculares à costa da PCSB. As correntes possuem resolução espacial de 1/3 de grau e representam correntes médias a cada 5 dias. Os vetores de correntes foram decompostos em componentes ao longo da costa e transversalmente à costa. Diagramas Hovmoller (espaço-tempo) para os dados da componente ao longo da costa foram construídos para explicar a variabilidade da ACSAT na PCSB.

2. Resultados e Discussão

A média e o desvio padrão da CSAT para todos os 15 anos analisados apresentaram padrões similares aos já apresentados por Garcia e Garcia (2008) e Giannini e Garcia (2009) em séries temporais pretéritas. As maiores médias da CSAT ($\sim 54,9 \text{ mg/m}^{-3}$) foram observadas na desembocadura do Rio La Plata, decrescendo em direção NE sobre a plataforma continental plataforma interna uruguaia e adentrando na porção interna da PCSB até as adjacências da desembocadura da Lagoa dos Patos.

O desvio padrão representou as maiores variações da CSAT ($\sim 3,2 \text{ mg/m}^{-3}$) na região no entorno da CBM e sobre a quebra da plataforma continental argentina, provavelmente associado à frente oceanográfica de quebra de plataforma frequente nessa região (Signorini et al., 2006). Altos valores do desvio padrão ($\sim 2,82 \text{ mg/m}^{-3}$) também foram observados sobre a PCSB, mais especificamente na região influenciada pela pluma do sistema lagunar Lagoa do Patos (32°S), que em épocas de altas pluviosidades associadas ao *El Niño*, pode alcançar a distância de 130 km em direção ao talude continental, aumentando a CSAT na plataforma continental ao largo da desembocadura do sistema (Ciotti et al., 1995). Os altos valores de desvio padrão ao sul da desembocadura da Lagoa dos Patos, entre as isóbatas de 50 e 200 m, indicaram que sobre a

região podem estar diferentes massas de água, desde águas costeiras, águas da pluma do Rio La Plata e águas subantárticas de plataforma oriundas da Patagonia (Piola et al., 2008).

Na plataforma interna argentina existe a presença de um filamento com baixo desvio padrão da CSAT ($\sim 1,48 \text{ mg/m}^{-3}$), possivelmente associado com a presença constante de uma corrente costeira com valores homogêneos de CSAT. Um baixo desvio padrão também foi encontrado na região da desembocadura do Rio La Plata onde altas concentrações de material em suspensão podem superestimar a CSAT das imagens orbitais (Garcia et al., 2005). A distribuição espacial do desvio padrão de toda a série temporal sobre a PCSB está relacionada com a sazonalidade do aporte das águas costeiras durante as diferentes estações do ano, sobretudo, pela pluma do Rio La Plata que durante o outono/inverno quando as altas descargas e ventos do quadrante S/SW podem favorecer o deslocamento da pluma do La Plata até a latitude de 26°S (Piola et al., 2008). Já durante a primavera/verão quando há dominância de ventos do quadrante N/NE associado à intensificação da CB, a pluma fica restrita à latitude de 33°S (Piola et al., 2008).

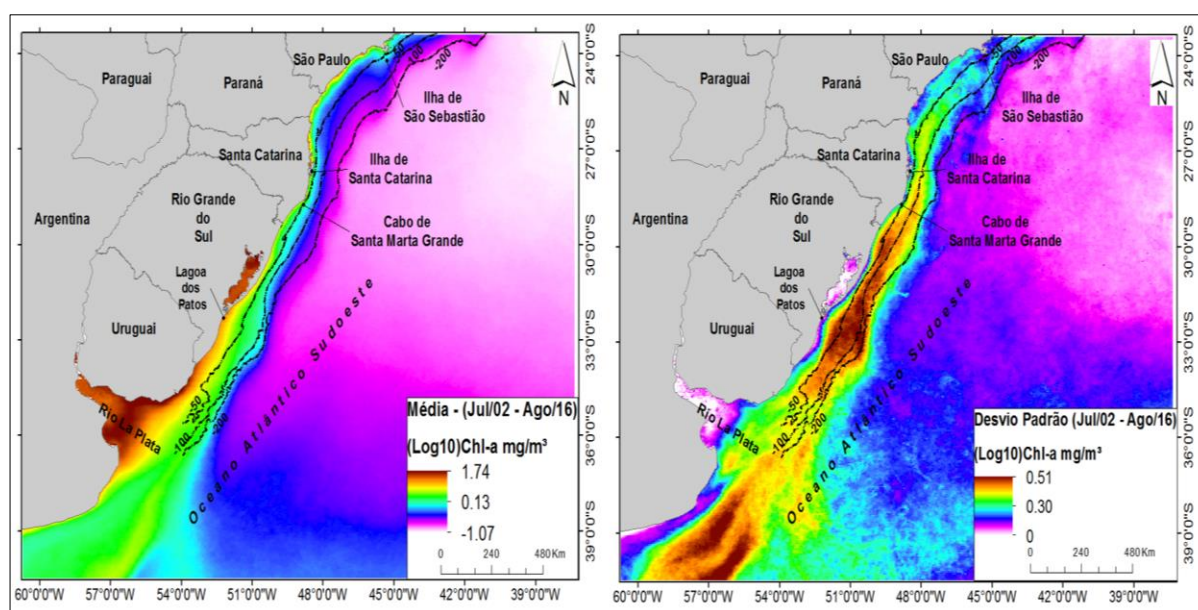


Figura 2: Imagens da média (esquerda) e do desvio padrão (direita) para toda a série temporal analisada na região de estudo.

As imagens das médias (Figuras 3A, 3B, 3C, 3D) e dos desvios padrões (Figuras 4A, 4B, 4C, 4D) para cada estação do ano mostram padrões que estão associadas aos campos de vento durante o outono/inverno (predominantes de S/SW) e primavera/verão (N/NE), como discutido exhaustivamente por Piola et al. (2008) e Garcia e Garcia (2008). Na primavera o aumento da média (Figura 3B) na porção externa da plataforma continental argentina é causado pela floração de primavera associada à frente oceanográfica de quebra de plataforma (Signorini et al, 2006). A imagem do desvio padrão referente ao inverno (Figura 4A) mostrou altos valores sobre a PCSB ao norte da Ilha de Santa Catarina (28°S) até as proximidades da Ilha de São Sebastião (24°S), provavelmente relacionados ao aumento dos aportes de águas continentais nessa região, principalmente pelos estuários Rio Itajaí-Açu, Canal do Linguado, Baía de Paranaguá e Cananéia-Iguape.

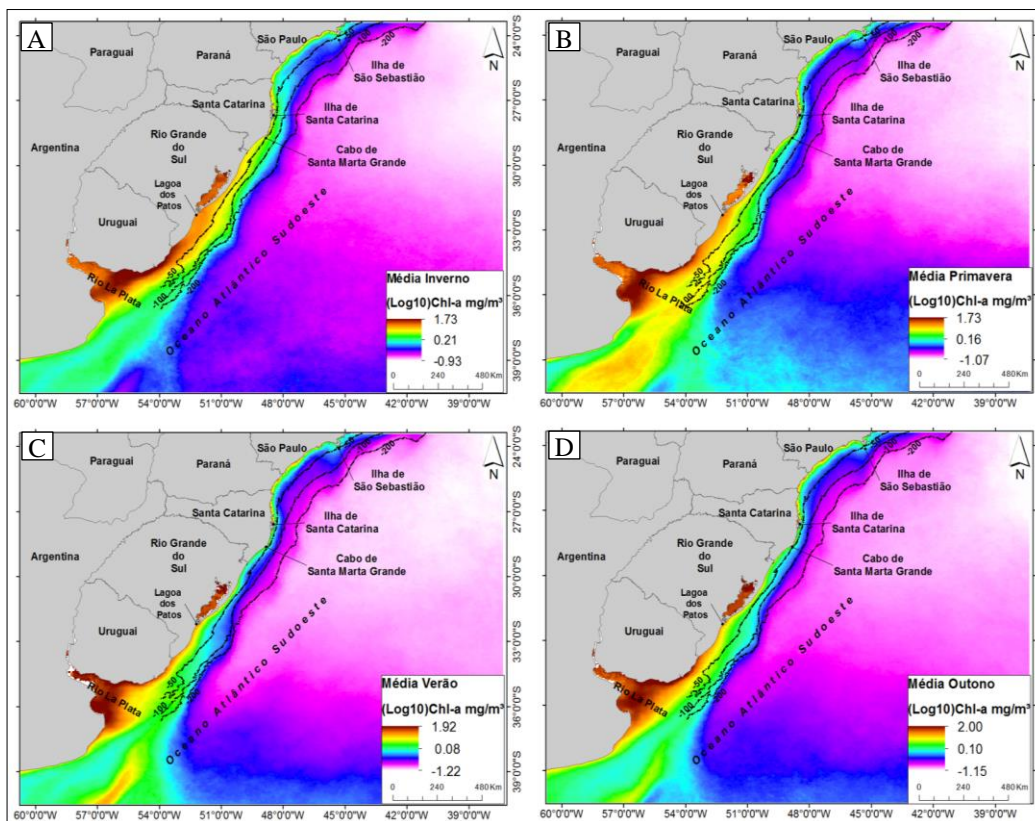


Figura 3 Imagens das médias sazonais da CSAT para a costa do Atlântico Sudoeste.

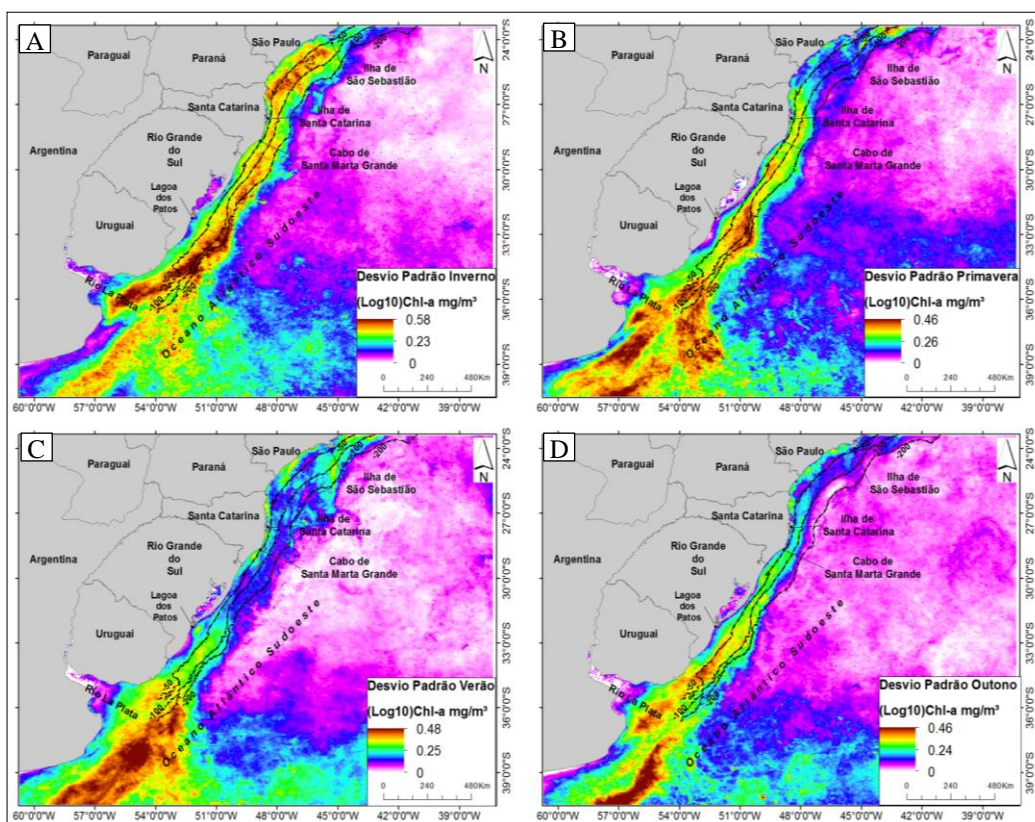


Figura 4 Imagens dos desvios padrões sazonais da CSAT para a costa do Atlântico Sudoeste.

A Figura 5 mostra a evolução temporal da ACSAT dos 12 pontos controles ao longo dos 15 anos para cada estação do ano. As ACSAT positivas máximas do inverno correspondem a eventos separados por exatamente uma década (2006 e 2016), com valores correspondentes a 3.98 e 6.92 mg/m^{-3} , respectivamente. A maior ACSAT positiva de inverno foi observada em 2016.

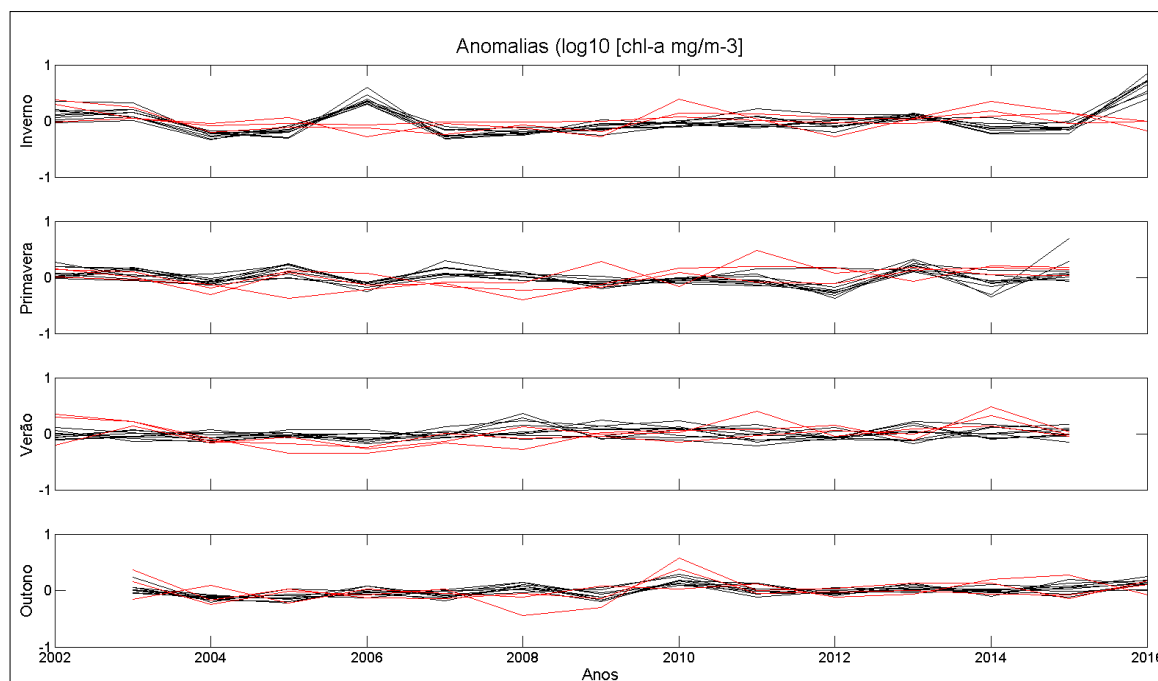


Figura 5: Sazonalidade da ACSAT para toda a série temporal. As linhas pretas e vermelhas referem-se aos pontos de controle ao norte e ao sul do ponto 3, respectivamente.

Os pontos controles de 4 a 12 (ver Figura 1) apresentam uma variabilidade sazonal similar, contrariamente aos pontos de 1 a 3, o que sugere diferentes condições oceanográficas governando os ciclos das ACSAT ao sul de 33°S . Enquanto ao norte de 33°S , a pluma do La Plata exerce grande influência na variabilidade temporal da ACSAT, ao sul desta latitude, a variabilidade é mais explicada pela incursão das águas superficiais subantárticas e pela pluma do La Plata no verão, quando os ventos de NE aprisionam a pluma na porção sul da desembocadura (Piola et al, 2008)

Como o inverno de 2016 apresentou a maior ACSAT entre todos os 15 invernos, uma investigação mais aprofundada foi realizada para todos os invernos com o uso de campos de correntes superficiais derivados de altimetria por satélites. Inicialmente, análises foram realizadas com as imagens das anomalias dos meses de junho, julho e agosto de 2016 (Figuras 6A, 6B e 6C) para verificar a variabilidade mês a mês. Observou-se que o evento de julho de 2016 foi o de maior magnitude da anomalia e ocupando a maior área, entre os paralelos 36°S e 24°S , sobre a PCSB. Também fica evidente dois filamentos de altas ACSAT ao sul de 36°S , representados por um fluxo de massa d'água provindas das regiões de altas latitudes que possivelmente influenciou as altas ACSAT encontradas na PCSB. A imagem da ACSAT de julho de 2016 mostra no extremo norte a presença de um giro ciclônico provavelmente relacionado com os vórtices presentes na Baía de Santos, já observado anteriormente por Silveira et al. (2000).

Com dados de correntes superficiais ao longo da costa, provenientes do OSCAR, diagramas de Hovmoller foram construídos em diferentes seções perpendiculares ao longo da costa sudeste (não mostrados aqui). A Figura 6D mostra o diagrama de Hovmoller que passa pelo ponto de controle 4. Observa-se que as correntes superficiais sobre a porção interna da PCSB

estavam mais intensas (velocidades acima de 40 cm/s) e dirigida para nordeste (representada pela cor azul na Figura 6D) durante um longo período (~ 60 dias), trazendo portanto massas d'água provenientes do sul, ricas em nutrientes, que muito contribuíram para o evento de maior ACSAT acima de 36°S. Observe que sobre a porção externa da PCSB é notável a dominância da CB em seu fluxo para o sul (em vermelho na Figura 6D).

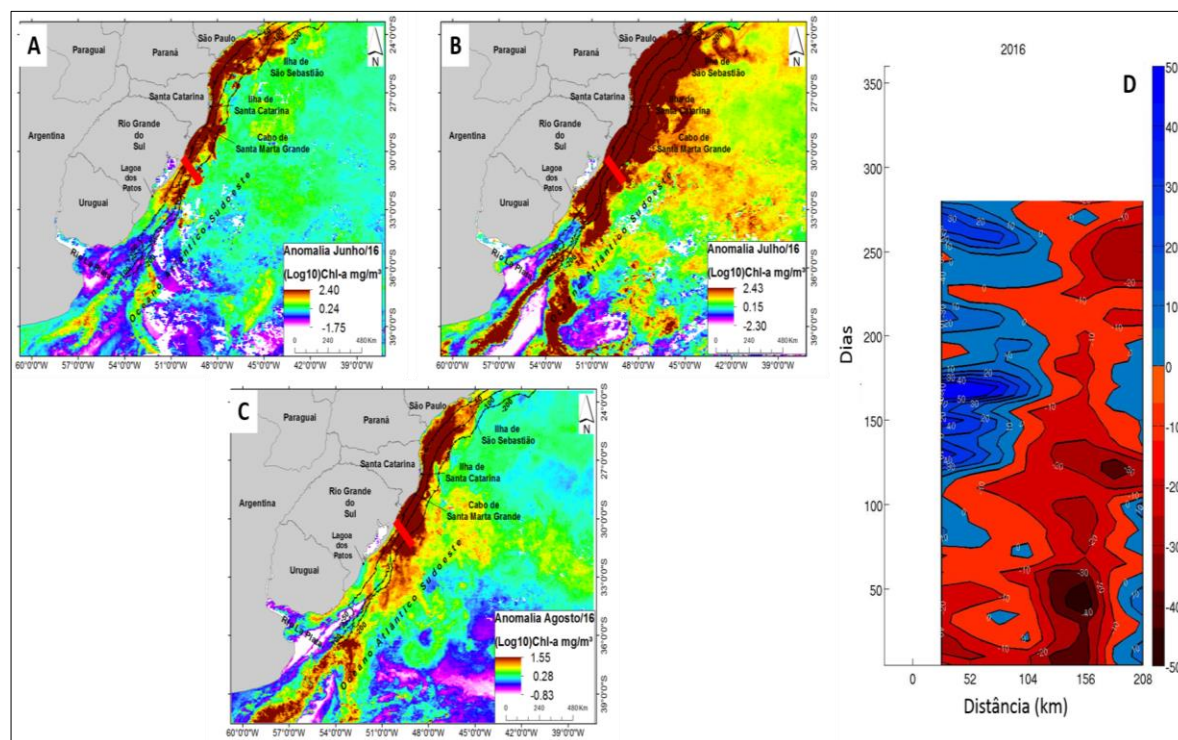


Figura 6 As anomalias da CSAT dos meses referentes a junho (A), julho (B) e agosto (C) de 2016. O diagrama de Hovmoller (D) da componente da corrente superficial derivada do OSCAR ao longo da costa mostra correntes para o norte (positivas e azul) e sul (negativas e vermelha).

3. Conclusões

A série temporal da CSAT referente aos 15 anos de atividade do sensor MODIS demonstraram distribuições espaciais similares para a média e o desvio padrão já observadas e discutidas em trabalhos anteriores. A investigação por estação de ano mostrou que a maior variabilidade do desvio padrão foi encontrada no inverno. As análises da variabilidade da ACSAT nos pontos controles mostraram que eventos de altas anomalias foram observados nos invernos de 2006 e 2016. Ao norte do ponto de controle 3, a variabilidade da ACSAT é similar enquanto que ao sul do mesmo, o comportamento é diferenciado.

O inverno de 2016 foi o que apresentou maiores ACSAT, provocadas pelas intensas correntes superficiais costeiras que trouxeram águas ricas em nutrientes do sul, responsáveis pelo excepcional acréscimo observado na biomassa fitoplanctônica na PCSB.

Agradecimentos

Os dados orbitais da cor do oceano foram fornecidos pelo MODIS/AQUA/NASA disponível em <http://www.modis.gsfc.nasa.gov/>. Souza, L.H.P. é bolsista do programa CIÊNCIAS DO MAR (CIMAR)/CAPES/UFSC-PPGOCEANO.

Referências Bibliográficas

Acha, E.M., Mianzan, H.W., Guerrero, R.A., Favero, M., Bava, J., Marine fronts at the continental shelves of austral South America, physical and ecological processes. **J.Mar.Syst.**44,83–105, 2004.

Ciotti, A.M.; Odebrecht, C.; Fillmann, G.; Moller, O.O. Fresh-water outflow and subtropical convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental-shelf. **Continental Shelf Research** 15, 1737-1756, 1995.

Garcia, C.A.E.; Garcia, V.M.T. Variability of chlorophyll-a from ocean color images in the La Plata continental shelf region. **Continental Shelf Research** 28 1568-1578, 2008.

Garcia, C.A.E.; Garcia, V.M.T.; McClain, C.R. Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, p. 125-137, 2005.

Giannini, M. E. C.; Garcia, C. A. E. Variabilidade sazonal e ciclos da temperatura e clorofila-a superficiais na costa sudoeste do oceano Atlântico Sul, através de imagens do sensor MODIS-Aqua. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR) 2009, Natal-RN, **Anais..** São José dos Campos: INPE, Artigos, p. 6471-6478, 2009,

Möller, O. O.; Piola, A. R.; Freitas, A. C.; Campos, E. J. D. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 13, p. 1607–1624, 2008.

Oscar Third Degree Resolution User's Handbook, . Ocean Surface Current Analysis (OSCAR) Third Degree Resolution User's Handbook, 2009. Disponível em: <http://apdrc.soest.hawaii.edu/doc/oscarthirdguide.pdf>>. Acesso em: 15 de agosto de 2016.

Piola, A.R.; Romero, S.I., Zajaczkovski, U. Space-time variability of the La Plata plume inferred from ocean color. **Continental Shelf Research**, this issue, 2008.

Signorini, S. R., Garcia, V. M. T., Piola, A. R., Seasonal and interannual variability of calcite in the vicinity of the Patagonian shelf break (38°S-52°S). **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 16, p. 1–5, 2006.