

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO -USP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAL - PROCAM

JOSELENE MARQUES

Análise de variabilidades ambientais no Oceano Atlântico Sul e Tropical, a partir de dados de produtividade primária, hidrodinâmicos e meteorológicos, obtidos por meio de sensoriamento remoto e modelos numéricos

Vol. 1

São Paulo

2010

**JOSELENE
MARQUES**

**Análise de
variabilidades
ambientais no
Oceano Atlântico
Sul e Tropical, a
partir de dados
de produtividade
primária,
hidrodinâmicos e
meteorológicos,
obtidos por meio
de sensoriamento
remoto e modelos
numéricos**

**MESTRADO
PROCAM
2010**

JOSELENE MARQUES

Análise de variabilidades ambientais no Oceano Atlântico Sul e Tropical, a partir de dados de produtividade primária, hidrodinâmicos e meteorológicos, obtidos por meio de sensoriamento remoto e modelos numéricos

**Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência Ambiental – PROCAM da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciência
Ambiental**

Área de concentração: Modelagem Numérica

Orientador: Joseph Harari

Vol. 1

São Paulo

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Catálogo na Publicação

Serviço de Documentação

Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental

PROCAM da Universidade de São Paulo

Marques, Joselene.

Análise de variabilidades ambientais no Oceano Atlântico Sul e Tropical, a partir de dados de produtividade primária, hidrodinâmicos e meteorológicos, obtidos por meio de sensoriamento remoto e modelos numéricos / Joselene Marques; orientador Joseph Harari – São Paulo, 2010.

Tese (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental PROCAM da Universidade de São Paulo. (Área de concentração: Modelagem Numérica) – PROCAM – Universidade de São Paulo – SP.

1- Produtividade Primária – Hidrodinâmica – Meteorológico. 2- Modelos Numéricos.
3- Oceano Atlântico Sul e Tropical

FOLHA DE APROVAÇÃO

Joselene Marques

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – PROCAM da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciência Ambiental
Área de concentração: Modelagem Numérica

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof.Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof.Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof.Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof.Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

A minha família, principalmente aos meus pais e ao meu filho Victor Antônio Marques Carlos Pereira, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e apoio afetivo, financeiro e moral durante todo o período de execução deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, pela conclusão deste projeto.

Agradeço ao professor Dr Joseph Harari pela oportunidade de iniciar este projeto, pela compreensão, dedicação e orientação nesses anos de pesquisa e aprendizagem, sem sua colaboração e seus conhecimentos não teria sido possível a realização deste projeto.

Agradeço também, a Nair Pereira por toda colaboração acadêmica prestada para que o desenvolvimento de meu projeto tivesse sucesso e culminasse em sua finalização.

Agradeço todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – PROCAM da Universidade de São Paulo que contribuíram para minha formação acadêmica.

Agradeço uma amiga muito querida Lourdes Bastianello e sua família pela amizade, companheirismo e carinho dedicado a mim nesses anos de estudo, sem sua ajuda não teria consigo vencer algumas barreiras que apareceram no decorrer de meus estudos.

Agradeço meus primos Mário Antônio Ornaghi e Sandra Zanoto Ornaghi por todo carinho, atenção e caridade que me prestaram, porque com certeza, sem sua ajuda jamais teria conseguido chegar até aqui.

Finalmente, agradeço a minha família, pai, mãe e filho que sempre foram referência de honestidade e persistência. Muito obrigada pelo amor e compreensão em diversas situações ocorridas nesses anos de estudo.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE SIGLAS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
I - INTRODUÇÃO.....	15
II - REVISÃO DE LITERATURA.....	19
III – DESCRIÇÃO METEORÓLOGICA, HIDRODINÂMICA E BIOLÓGICA DA REGIÃO DE ESTUDO.....	31
III.1 – Topografia e climatologia de superfície.....	31
III.2- Padrões de circulação oceânica no Atlântico Sul e Tropical.....	36
III.3 – Produtividade primária e a importância do fitoplâncton.....	41
IV- MATERIAL E MÉTODOS.....	46
V – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
V.1 – Caracterização das variáveis físicas e biológicas.....	48
V.2 - Produtividade primária líquida e clorofila a.....	48
V.3 - Parâmetros meteorológicos e hidrodinâmicos.....	63
V.4 – Correlações entre parâmetros biológicos e físicos.....	78
VI- CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
S	Sul
N	Norte
W	Oeste
E	Leste
EW	Leste-oeste
NS	Norte-sul
CZCS	Coastal-Zone Color Scanner
SeaWiFS	Sea Viewing Wide Field- of-View System
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
DAAC	NASA's Distributed Active Archive Center
CO ₂	Gás Carbônico
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
POM	Princeton Ocean Model
IO/USP	Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
IAG/USP	Instituto Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCAR	National Centers for Atmospheric Research
ZCIT	Zona de Convergência Inter-tropical
CSE	Corrente Sul Equatorial
CAS	Corrente do Atlântico Sul
CNB	Corrente Norte do Brasil

CB	Corrente do Brasil
ACAS	Água Central do Atlântico Sul
CCI	Corrente de Contorno Intermediária
SNB	Sub-corrente Norte do Brasil
AT	Água Tropical
AIA	Água Intermediária Antártica
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
CCP	Corrente de Contorno Profunda
PPL	Produtividade primária líquida
VGPM	Vertical Generalized Production Model
CbPM	Carbon-based Productivity Model

LISTAS DE FIGURAS

Fig.1.1	Visualização da área a ser coberta pela pesquisa.	16
Fig. 2.1	Imagens da cor do oceano a partir de dados do SeaWiFS, segundo valores médios no verão austral (esquerda) e inverno austral (direita).	25
Fig. 2.2	Produtividade média nos oceanos, calculada a partir de dados de satélite, para o período de um ano, de Setembro de 1998 a Agosto de 1999.	26
Fig. 2.3	Anomalias instantâneas do nível da superfície do mar no Atlântico Sul e Tropical, calculadas a partir de dados de altimetria de satélite TOPEX / POSEIDON.	28
Fig 3.1	Batimetria do Oceano Atlântico, com as isóbatas de 1000, 3000 e 5000 m; regiões com menos de 3000 m de profundidade são hachuradas (retirada do livro Tomzack,2002)	32
Fig. 3.2	Mapas globais de pressão atmosférica e ventos ao nível do mar climatológicos, em janeiro e julho.	33
Fig. 3.3	.As correntes da superfície do Oceano Atlântico.	35
Fig. 3.4	Padrões de circulação de larga escala em superfície para o Atlântico Sul. Extraído de Stramma & England (1999).	36
Fig. 3.5	Padrões de circulação de larga-escala ao nível de 200 metros para o Atlântico Sul. Adaptado de Stramma & England (1999).	38
Fig. 3.6	Representação esquemática da circulação no Oceano Atlântico Sul, entre 0°e 20°S. Painel superior: 0 a 100 m de profundidade; painel inferior: Em nível picnoclínico. Adaptado de Stramma & Schott (1999).	39
Fig. 3.7	Representação esquemática da circulação no Oceano Atlântico Sudoeste a 800 m de profundidade. Adaptado de Silveira et AL AP Soutelino. (2000).	40
Fig.3.8	Representação esquemática da circulação a 2000-2500 m no Oceano Atlântico Sul. Adaptado de Silveira et al. (2000).	40
Fig. 5.1	Distribuições da produção primária calculada por CbPM, na superfície do Atlântico Sul e Tropical, em 2004, 2005 e 2006, nos meses de julho (a) e dezembro (b), em $\text{mg C.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.	51
Fig. 5.2	Distribuições das concentrações de clorofila a na superfície do Atlântico Sul e Tropical nos meses de julho (a) e dezembro (b), nos anos de 2004 a 2006, em mg/m^3 .	55
Fig. 5.3	Distribuições da produção primária calculada por Eppley-VGPM, na superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em $\text{mgC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.	59
Fig. 5.4	Distribuições da produção primária calculada por VGPM, na superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em $\text{mgC.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.	62
Fig. 5.5	Distribuições da temperatura na superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em °C.	66
Fig. 5.6	Distribuições da elevação da superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em m.	69
Fig. 5.7	Distribuições da pressão atmosférica na superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em hPa.	73
Fig. 5.8	Distribuições de ventos na superfície (vetores e intensidade sombreada) do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em m/s.	77
Fig. 5.9	Correlações da produtividade primária calculada por CbPM e as variáveis de superfície: temperatura do mar, nível do mar, pressão atmosférica e ventos (componentes EW e NS).	81

- Fig. 5.10** Correlações da concentração de clorofila e as variáveis de superfície: temperatura do mar, nível do mar, pressão atmosférica e ventos (componentes EW e NS). **84**
- Fig. 5.11** Correlações da produtividade primária calculada por Eppley – VGPM e as variáveis de superfície: temperatura do mar, nível do mar, pressão atmosférica e ventos (componentes EW e NS). **87**
- Fig. 5.12** Correlações da produtividade primária calculada por VGPM e as variáveis de superfície: temperatura do mar, nível do mar, pressão atmosférica e ventos (componentes EW e NS). **89**

RESUMO

Este projeto tem por objetivo determinar variabilidades ambientais no Oceano Atlântico Sul e Tropical, a partir da análise de variáveis biológicas, hidrodinâmicas e meteorológicas – concentrações de clorofila e produtividade primária, temperatura e elevação da superfície do mar, pressão atmosférica e ventos na superfície – no período compreendido entre 2004 e 2006. A região de interesse se encontra entre as coordenadas 85°S-30°N e 70°W-25°E, que cobre toda a costa brasileira e área oceânica adjacente, além da região equatorial. O estudo foi realizado a partir de medições por satélite, resultados de modelo numérico hidrodinâmico desta região e resultados de modelo atmosférico global, o que permite o estabelecimento de um modelo estatístico que represente as inter-relações entre os efeitos biológicos, hidrodinâmicos e meteorológicos. Há um padrão sazonal em relação à distribuição de clorofila *a* no Atlântico Sul e Tropical, o qual é também observado nas distribuições de produtividade primária calculada por três tipos de algoritmos, mas havendo também influências de descargas de rios, ressurgências costeiras e confluências de correntes. As variáveis físicas também demonstraram forte caráter sazonal. As distribuições espaciais das correlações cruzadas entre os parâmetros biológicos e físicos demonstraram uma variação latitudinal significativa. Por exemplo, a componente meridional dos ventos possui alta correlação positiva com os parâmetros biológicos próximo ao equador, especialmente no lado Oeste do Atlântico Sul, enquanto a temperatura do mar apresenta altas correlações negativas em baixas latitudes e positivas em altas latitudes. As variações de algoritmos para o cálculo da produção primária resultaram em variações das correlações com os parâmetros meteorológicos e oceanográficos; o estudo demonstra a importância da diferenciação dos algoritmos utilizados para o cálculo de produtividade, de forma a se detectar as causas dessas variações e que modelo seria o mais adequado. O ponto mais importante do presente trabalho

se encontra na verificação de altas correlações entre os parâmetros biológicos e físicos, o que demonstra que variações ambientais associadas ao aquecimento global, tais como o aumento da temperatura do ar e do mar, poderão ter graves conseqüências na distribuição de clorofila e na produtividade primária, com importantes reflexos na cadeia alimentar e nas próprias condições ambientais, afetando por exemplo a fixação do carbono no oceano, e novamente a temperatura do planeta.

DESCRITORES: modelagem numérica, sensoriamento remoto, produção primária, parâmetros hidrodinâmicos e meteorológicos , Atlântico Sul e Tropical.

ABSTRACT

Analysis of environmental variability in the South and Tropical Atlantic Ocean, from primary productivity data, hydrodynamic and meteorological obtained through remote sensing and numerical models

This project aims to determine the environmental variability in the Atlantic Ocean and Tropical South, from the analysis of biological hydrodynamic and meteorological variables - concentrations of chlorophyll and primary productivity, temperature and elevation of the sea surface, atmospheric pressure and winds at the surface - in period between 2004 and 2006. The region of interest lies between latitudes 85 ° S-30 ° N and 70 ° W-25 ° E, which covers the entire Brazilian coast and adjacent oceanic area, and the equatorial region. The study was conducted from satellite measurements, results of a regional numerical hydrodynamic model and results of global atmospheric model, which allows the establishment of a statistical model representing the interrelationships between the biological, hydrodynamic and meteorological parameters. There is a seasonal pattern for the distribution of chlorophyll *a* in the South and Tropical Atlantic, which is also observed in the distribution of primary productivity measured by three types of algorithms, but there is also influence by discharges from rivers, coastal upwellings and currents confluence. The physical variables also showed strong seasonal character. The distributions of cross-correlations between the physical and biological parameters showed a significant latitudinal variation. For example, the meridional component of wind has a high positive correlation with biological parameters near the equator, especially on the west side of the South Atlantic, while the sea temperature has high negative correlation at low latitudes and positive at high latitudes. The variations of algorithms to calculate the primary production resulted in changes in correlations with the meteorological and oceanographic data; the study demonstrates the importance of differentiation of algorithms

used to calculate productivity, in order to identify the causes of these variations and which model would be more appropriate. The most important point of this study is the finding of high correlations between the biological and physical parameters, which demonstrates that environmental changes linked to global warming, such as increasing air and sea temperatures, could have serious consequences for the distribution of chlorophyll and primary productivity, with important consequences in the food chain and the environmental conditions themselves, affecting for example carbon sequestration in the ocean, and again the temperature of the planet.

DESCRIPTORS: numerical modeling, remote sensing, primary production, hydrodynamic and meteorological parameters, South and Tropical Atlantic.

I - INTRODUÇÃO

O clima da Terra é entendido como o estado médio de 5 componentes: atmosfera, hidrosfera, biosfera, criosfera e litosfera, e suas inter-relações. Este projeto pretende estudar as variabilidades e correlações entre 3 desses 5 compartimentos: biosfera, hidrosfera e atmosfera.

A superfície do nosso planeta é coberta por 70% de água líquida e os oceanos constituem 96% da hidrosfera, sendo um agente primordial na definição do clima na Terra. A importância dos oceanos para a vida na Terra é fundamental: eles evaporam e fornecem água doce para a vida terrestre, e a vida marinha é um elo chave na cadeia de alimentação global. É importante frisar a extrema complexidade do clima e das interferências entre seus elementos, como as inter-conexões entre a vida e a dinâmica do oceano e da atmosfera; por exemplo, um aspecto de grande interesse de pesquisa na ciência moderna se encontra na forma como concentrações de fitoplâncton são afetadas por parâmetros termodinâmicos, e também como essas concentrações podem interferir na temperatura do planeta, através da remoção de gases estufa, como o dióxido de carbono (IPCC, 2007).

Atualmente, através do sensoriamento remoto por satélites, observações de diversas variáveis, em escala global, são regularmente disponibilizadas na Internet. Dada a enorme quantidade de dados que podem ser obtidos pelas medições remotas, bem como saídas de modelos meteorológicos e oceânicos que possuem cobertura global, optou-se por restringir a área de estudo à região do oceano compreendida entre as coordenadas 85°S-30°N e 70°W-25°E, que cobre toda a costa brasileira e área oceânica adjacente, além do Atlântico Equatorial, sendo a área que mais afeta o país, em termos de pesca e condições ambientais (Figura 1.1).

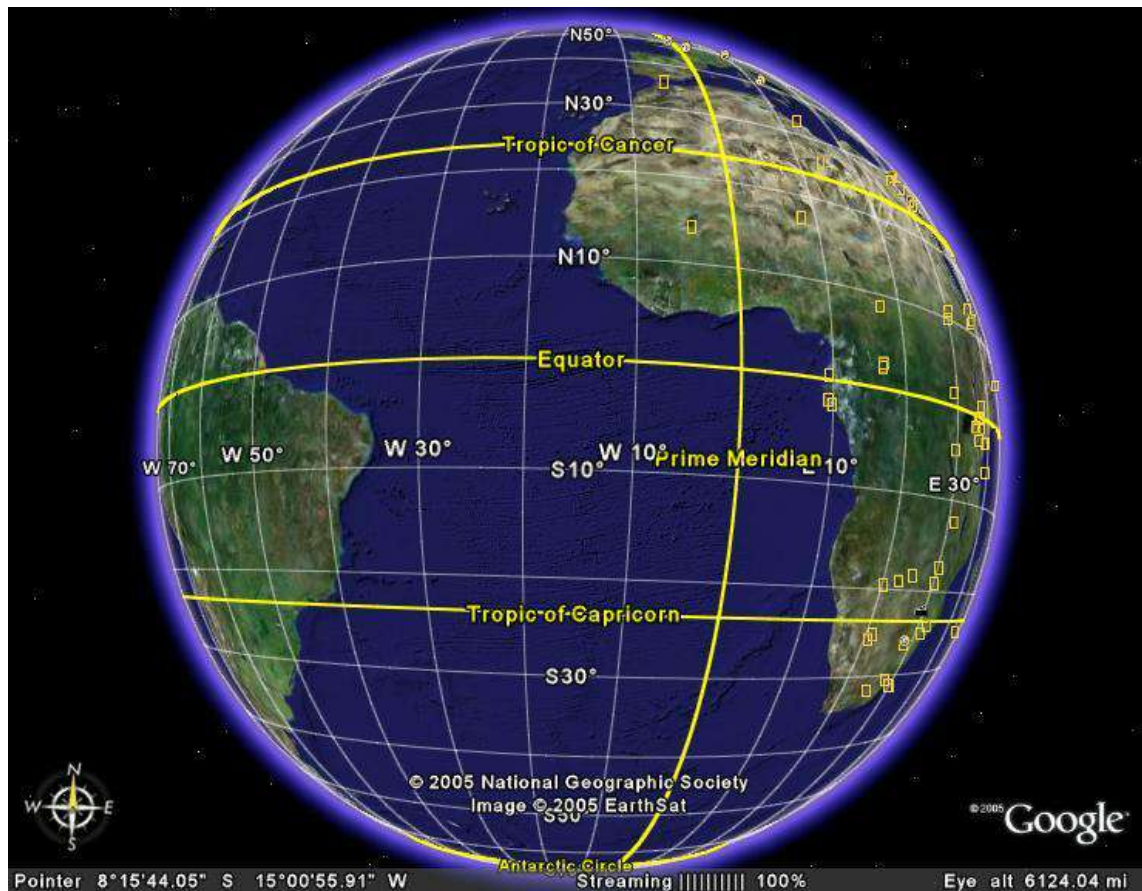


Fig.1.1: Visualização da área a ser coberta pela pesquisa.

Apesar da abundância de medições disponíveis, não foram mapeadas precisamente as variabilidades de parâmetros biológicos, físicos e meteorológicos, bem como as correlações entre os mesmos. Isto se deve à dificuldade de processar estas observações, devido à complexidade de sua dependência espaço-temporal, com escalas temporais desde as decadais até as sazonais (e, inclusive, períodos menores, de alguns dias) e escalas espaciais que vão desde hemisféricas até estuarinas. Para resolver este problema, este trabalho busca desenvolver um formato de análise que permita a manipulação e análise das variáveis, de modo que as mesmas possam ser comparadas estatisticamente. O conhecimento das variabilidades e das correlações entre parâmetros biológicos, físicos e meteorológicos serviu para a construção de um modelo matemático que poderá fornecer subsídios aos diferentes setores interessados nas variabilidades ambientais do Atlântico Sul e Tropical – empresas de

pesca, meteorologistas, oceanógrafos, organizações ambientais, autoridades governamentais, etc..

O Brasil tem 8.500 Km de costa marítima e 200 milhas de zona econômica exclusiva e conta com estrutura organizada de pesca em várias regiões, com colônias de pescadores, pescadores artesanais e um setor industrial de pesca, havendo entretanto necessidade de um aprimoramento contínuo da política nacional voltada a essa atividade. Dentre as dificuldades encontradas na pesca, se encontra a complexidade de pescarias em águas muito profundas, porque o Brasil não teve, nos últimos anos, programa de modernização dos barcos de captura e nem embasamento científico e tecnológico nesta área. Os resultados da pesquisa realizada poderão futuramente servir de apoio à pesca, dando condições para que a mesma se torne mais produtiva e menos prejudicial ao ambiente, com uma adequada recuperação de estoques.

O problema a ser estudado é o de determinar as variabilidades e as correlações entre as seguintes variáveis oceânicas: concentração de clorofila, produtividade primária, temperatura e elevação da superfície, pressão atmosférica e ventos na superfície, para a região compreendida entre as coordenadas 85°S-30°N e 70°W-25°E, dando seguimento a trabalho iniciado por Pereira (2009). A partir das correlações obtidas, se devem propor um modelo estatístico que parametrize este relacionamento.

A hipótese básica da pesquisa desenvolvida é que há uma correlação significativa entre a produtividade primária do oceano, parâmetros físicos (elevação e temperatura da superfície do mar) e influências meteorológicas (pressão atmosférica e ventos de superfície). Esta correlação ocorre tanto em termos de tendências de longo prazo (decadais) com também nas oscilações interanuais, sazonais e também em pequenos períodos (da ordem de alguns dias).

A verificação desta hipótese requer a determinação das variações ambientais na região de interesse, para o período de dados disponíveis, de 2004 a 2006, e a obtenção de correlações

entre as respectivas variáveis. Com os resultados obtidos na pesquisa, serão obtidos subsídios a órgãos governamentais que tem como objetivo monitorar, analisar e estabelecer relações que possam proporcionar um melhor desempenho em diversas áreas com interesse ambiental.

II – REVISÃO DE LITERATURA

O fitoplâncton corresponde a vegetais microscópicos que vivem no oceano, havendo muitas espécies, cada uma das quais com formas características. Coletivamente, o fitoplâncton cresce abundantemente nos oceanos ao redor do mundo, sendo a base da cadeia alimentar marinha. Peixes pequenos, e algumas espécies de baleias, consomem o fitoplâncton; peixes maiores consomem os peixes menores e o ser humano se alimenta de muitos destes peixes maiores. Considerando que o fitoplâncton depende de certas condições para crescimento, ele é um bom indicador de mudanças no ambiente marinho (Clark e Sherman, 1986 *apud* Kampel 2003). O fitoplâncton requer luz solar, água e nutrientes para crescimento. Como a luz solar é muito abundante próxima à superfície do mar, o fitoplâncton fica na superfície ou próximo a ela. Também como as plantas terrestres, o fitoplâncton contém pigmentos de clorofila, o que lhe dá a cor esverdeada. A clorofila é usada através de plantas para fotossíntese, na qual a luz solar é usada como uma fonte de energia para transformar moléculas de água e gás carbônico em carboidratos – os alimentos das plantas. Fitoplâncton e plantas em terra usam carboidratos para crescer; peixes e humanos consomem plantas para adquirir estes mesmos carboidratos.

A atmosfera é uma fonte rica em gás carbônico, com milhões de toneladas deste gás penetrando nos oceanos todos os anos. Porém, o fitoplâncton ainda requer outros nutrientes, como ferro, para sobreviver (Behrenfeld. et al, 1996) . Quando águas de fundo afloram à superfície, trazem estes nutrientes essenciais para o fitoplâncton; porém, quando águas superficiais estão quentes (como durante a ocorrência de um El Niño no Oceano Pacífico Oriental), elas não permitem que as águas mais frias aflorem, e efetivamente bloqueiam o fluxo de nutrientes. Na falta de alimentos para o fitoplâncton, faltam também alimentos para os peixes e mamíferos que dependem deles. Até mesmo em condições ideais, um fitoplâncton

individualmente só vive um dia ou dois; quando morre, cai rumo ao fundo do mar; por conseguinte, em escala de tempo geológica, o oceano se tornou a principal forma de armazenamento para o gás carbônico atmosférico. Aproximadamente 90% do total de carbono do mundo se estabeleceu no fundo do oceano, principalmente na forma de biomassa morta.

O gás carbônico (CO₂) normalmente existe em estado gasoso como uma molécula linear, sem cor e odor, sendo mais denso que ar; esse gás é um dos produtos de combustão de carbono ou produtos que contém carbono, quando queimados em um meio abundante de oxigênio ou ar. O gás carbônico é um produto de respiração dos animais - se combina com hemoglobina nas células vermelhas de sangue, sendo levado aos pulmões, onde é expirado e trocado por oxigênio. A vegetação usa clorofila para combinar gás carbônico com hidrogênio (da água), de modo a formar carboidratos, em um processo conhecido como fotossíntese.

O gás carbônico (ou dióxido de carbono) é o quarto gás mais abundante na atmosfera; este gás captura a radiação infravermelha emitida da superfície de Terra: no início do processo, ele é transparente à luz solar penetrante, a qual esquentando a superfície, que por sua vez emite de volta radiação infravermelha, a qual é absorvida pelas moléculas da atmosfera, dentre elas o gás carbônico, num processo conhecido como efeito estufa.

O efeito estufa é um processo que acontece naturalmente em nosso planeta e o principal gás estufa é o vapor d'água. O efeito estufa tornou-se uma preocupação para a sociedade pois acredita-se que o processo esteja sendo alterado pela forma do uso de energia nos últimos 100 anos. O ponto mais importante do efeito estufa é que há um delicado equilíbrio entre a quantidade de energia que vem do sol e a quantidade de energia refletida para o espaço; este equilíbrio mantém o clima da Terra estável (IPCC, 2007).

O problema do efeito estufa se deve ao despejo na atmosfera de mais gases estufa - especialmente dióxido de carbono e metano - através da queima de combustível fóssil (gás, carvão), com o uso de aerossóis, e outras fontes. Gases estufa absorvem (seguram) a radiação

que deveria ser refletida para o espaço, fazendo a temperatura da Terra subir, caracterizando o chamado "efeito estufa". E mesmo uma elevação de apenas meio grau na temperatura média dos oceanos e da Terra pode causar sérias alterações nos eco-sistemas. Entretanto, embora o efeito estufa seja razoavelmente bem conhecido, há muitas controvérsias entre os cientistas em relação às escalas de tempo nas alterações climáticas do planeta (IPCC, 2007).

Como anteriormente citado, o fitoplâncton usa gás carbônico para fotossíntese; quanto maior a população de fitoplâncton, mais gás carbônico é “puxado” da atmosfera; conseqüentemente, diminui o efeito estufa e o conseqüente aquecimento do planeta. Portanto, como fitoplâncton é influenciado pelas condições ambientais, mas também exerce uma influência no clima global, seu estudo é de interesse primário aos oceanógrafos e cientistas da Terra. Pesquisas demonstram que uma população de fitoplâncton pode dobrar no período de um dia. Isto significa que o fitoplâncton responde muito rapidamente a mudanças no meio ambiente. Grandes populações destes organismos, mantidos por longos períodos de tempo, poderiam abaixar significativamente o nível de gás carbônico atmosférico e, em conseqüência, manter temperaturas médias mais baixas. Dessa forma, o fitoplâncton é um excelente indicador de mudanças globais. Como descrito acima, o fitoplâncton depende de luz solar, água e nutrientes para sobreviver. Alterações físicas ou químicas dessas propriedades, numa determinada região, rapidamente afetam as concentrações de fitoplâncton. Portanto, mudanças nas tendências de uma determinada população de fitoplâncton - como sua densidade, distribuição ou taxa de crescimento - constituem alerta de que condições ambientais estão mudando. Então, comparando estas tendências de fitoplâncton com outras medidas - como temperatura - se pode determinar como o fitoplâncton pode estar contribuindo, ou sendo afetado, pelas mudanças climáticas e ambientais (Seawifis).

O fitoplâncton pode ser visto em quase todos os mares do mundo e lagos, dando para a água sua cor esverdeada. Em áreas onde o fitoplâncton é escasso, como os grandes giros sub-

tropicais, a água é bastante clara e ligeiramente azul. Observando a cor do oceano através de satélites se pode ter uma idéia de quanto fitoplâncton há em qualquer região particular do globo (Signorini, Hooker & McClain, 2003). A partir disso, se pode calcular quanto carbono pode ser “capturado”.

Se para olhos humanos o oceano tem cor azul, às vezes azul-esverdeado, do espaço exterior, sensores de satélites podem distinguir variações mínimas, as quais revelam a presença de concentrações discrepantes de sedimentos, materiais orgânicos, ou até mesmo fitoplâncton. Devido ao seu pigmento de clorofila, o fitoplâncton preferencialmente absorve as porções vermelhas e azuis do espectro de luz (para fotossíntese) e reflete a luz verde. Assim, o oceano com alta concentração de fitoplâncton aparece como azul-esverdeado a verde, dependendo do tipo e densidade da população de fitoplâncton (Seawifis).

No oceano, plantas e certas bactérias processam combinações inorgânicas (como gás carbônico e água), num processo conhecido como produção primária. Dessa forma, materiais básicos que se acham no mar, ar e no fundo dos oceanos são transformados em matéria viva. Por centenas de milhões de anos, esta conversão ininterrupta é realizada pelo fitoplâncton, estes vegetais microscópicos que eternamente derivam com as correntes. Na produção primária do fitoplâncton, as células de plantas usam energia na forma de luz para converter matérias-primas, como oxigênio, nitrogênio, água e gás carbônico, em comida, num processo chamado fotossíntese (Behrenfeld. & Falkowski, 1997).

Muito do material orgânico produzido a partir do gás carbônico é reciclado continuamente através de vários organismos, mas uma porção cai ao fundo do oceano e se assenta em pedras sedimentares, participando de processos geológicos - muitas destas rochas são eventualmente levadas ao manto da Terra por processos tectônicos (Falkowski, Barber, Smetacek, 1998). Processos vulcânicos re-emitem o carbono na atmosfera como gás

carbônico, completando um processo conhecido como o ciclo do carbono. Este ciclo afeta a quantidade de carbono achada na atmosfera em períodos de tempo geológicos.

Porém, o papel exato do fitoplâncton nas mudanças climáticas globais não é totalmente entendido. Conhecer mais sobre esta relação é muito importante para desenvolver uma compreensão melhor sobre o ciclo do carbono e o clima global (Behrenfeld. & Falkowski, 1997).

Além do interesse científico, como muitos países são dependentes da pesca para alimentação e comércio, as saúdes e economias de muitas pessoas também são dependentes deste primeiro elo da cadeia alimentar no oceano.

Há, portanto, dois interesses principais nas pesquisas em todo o mundo: 1) Como mudanças no fitoplâncton dos oceanos (natural ou artificialmente) afetam o clima global? 2) Como tais mudanças afetam o suprimento de alimentos no oceano? Os primeiros passos para responder estas perguntas são: 1) estimar a produtividade no oceano, 2) verificar a precisão desta estimativa, 3) determinar como varia a produtividade, em função de parâmetros hidrodinâmicos e meteorológicos, e 4) verificar se há tendências em longo prazo significativas.

A tarefa atual dos cientistas é achar técnicas para boas estimativas da produção primária nos oceanos, explorando modelos estatísticos e semi-analíticos, a partir de medidas de plataformas orbitais (Behrenfeld, Falkowski & Randerson, 1998).

Modelos semi-analíticos usam relações conhecidas entre processos biológicos e físicos para alcançar uma estimativa de produção primária total. Estes modelos ainda estão em desenvolvimento, e apesar de grandes imprecisões regionais, devem produzir resultados de interesse, à medida que mais dados são disponibilizados (Behrenfeld & Falkowski, 1997a).

Modelos estatísticos envolvem relações simples entre medidas por satélite; observações da cor do oceano proporcionam a estimativa das concentrações de clorofila, e a

produtividade primária pode ser estimada a partir da cor do oceano, temperatura da superfície e radiação solar incidente. Estas soluções podem prover métodos de avaliar tendências em longo prazo, regionais e globais, tanto da clorofila como da produtividade primária (Seawifis).

A primeira fase do desenvolvimento de modelos estatísticos foi baseada em dados de cor do oceano do Coastal-Zone Color Scanner (CZCS), o qual estava a bordo do satélite da [NASA Nimbus 7](#) (de Novembro de 1978 a Junho de 1986); atualmente, se tem dados do [Sea Viewing Wide Field-of-View System \(SeaWiFS\)](#) e do [Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer \(MODIS\)](#), disponibilizados pelo [NASA's Distributed Active Archive Center \(DAAC\)](#), do Goddard Space Flight Center.

A Figura 2.1 mostra mapas da cor do oceano a partir de medições do SeaWiFS, para condições médias de verão e inverno (austrais), na área de interesse da pesquisa.

A "cor" do oceano é determinada pelas interações de luz incidente com substâncias ou partículas presentes na água. Os componentes mais significativos são organismos fotosintéticos flutuantes (fitoplâncton) e partículas inorgânicas. Fitoplâncton contém clorofila, que absorve luz nos comprimentos de onda azuis e vermelhos e transmite no verde. Materiais particulados podem refletir e absorver luz, o que reduz a transmissão da luz na água; substâncias dissolvidas na água também podem afetar sua cor. O termo "dados de cor de oceano" significa medidas precisas de intensidade da luz nos comprimentos de onda do visível. Como dados da cor de oceano são relacionados à presença dos componentes descritos acima, eles podem ser usados para calcular as concentrações de material na superfície do oceano e o nível de atividade biológica. Observações da cor do oceano a partir de órbita de Terra permitem uma visão global que é impossível de navio ou a partir da costa.

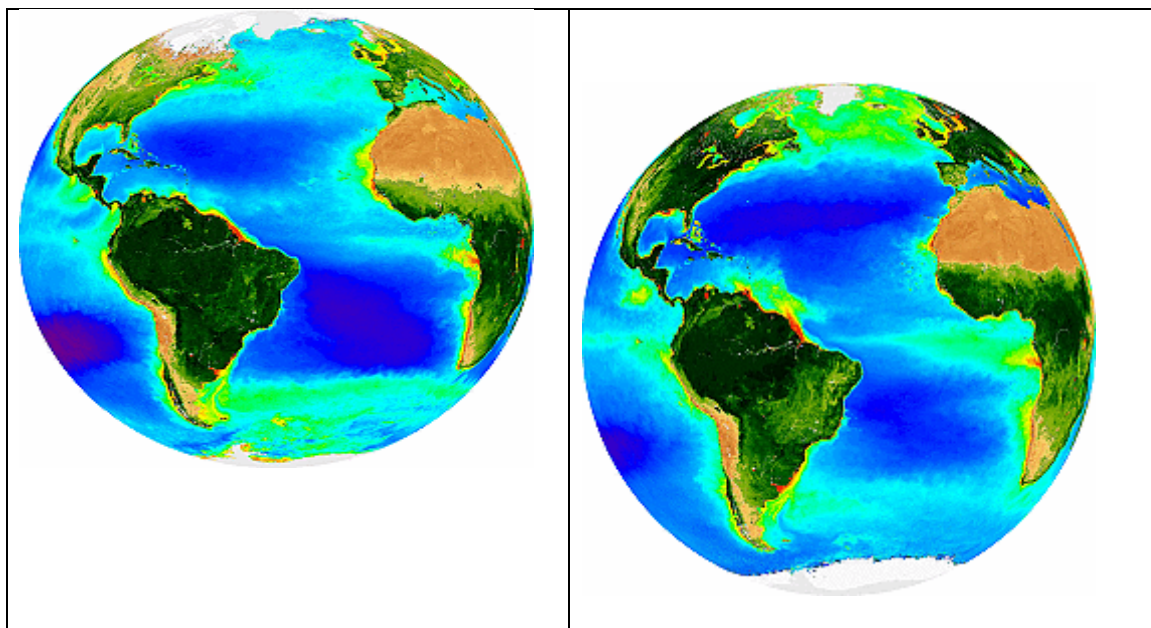


Fig. 2.1 – Imagens da cor do oceano a partir de dados do SeaWiFS, segundo valores médios no verão austral (esquerda) e inverno austral (direita).

“Cor de oceano” se refere, portanto, à percepção conceitual da variabilidade de propriedades ópticas no oceano e o uso dessas propriedades para derivar informações de caráter biológico e físico (e às vezes geológico), em processos que ocorrem na superfície do oceano ou próximo a ela. Dados de cor de oceano se referem, principalmente, a observações remotas feitas de instrumentos em satélites (e também em aviões e navios de pesquisa). Estes instrumentos medem intensidades da luz (“radiâncias”), com precisão tal que podem ser convertidos, através de algoritmos devidamente calibrados, em produtos geofísicos; destes, o mais importante, é a concentração de clorofila - *a*, o pigmento vital que habilita a produção foto sintética de carbono orgânico em plantas. No oceano, a clorofila é principalmente encontrada no fitoplâncton, a “base” da cadeia alimentar oceânica; assim, o conhecimento dos padrões de concentração de clorofila no oceano proporciona uma percepção da dinâmica biológica dos oceanos; outro produto do processamento de dados da cor do oceano, combinados através de algoritmos com dados de temperatura e radiação incidente, é a

produtividade primária (ver Figura 2.2, com mapa a média da produtividade primária dos oceanos, para um período de um ano completo).

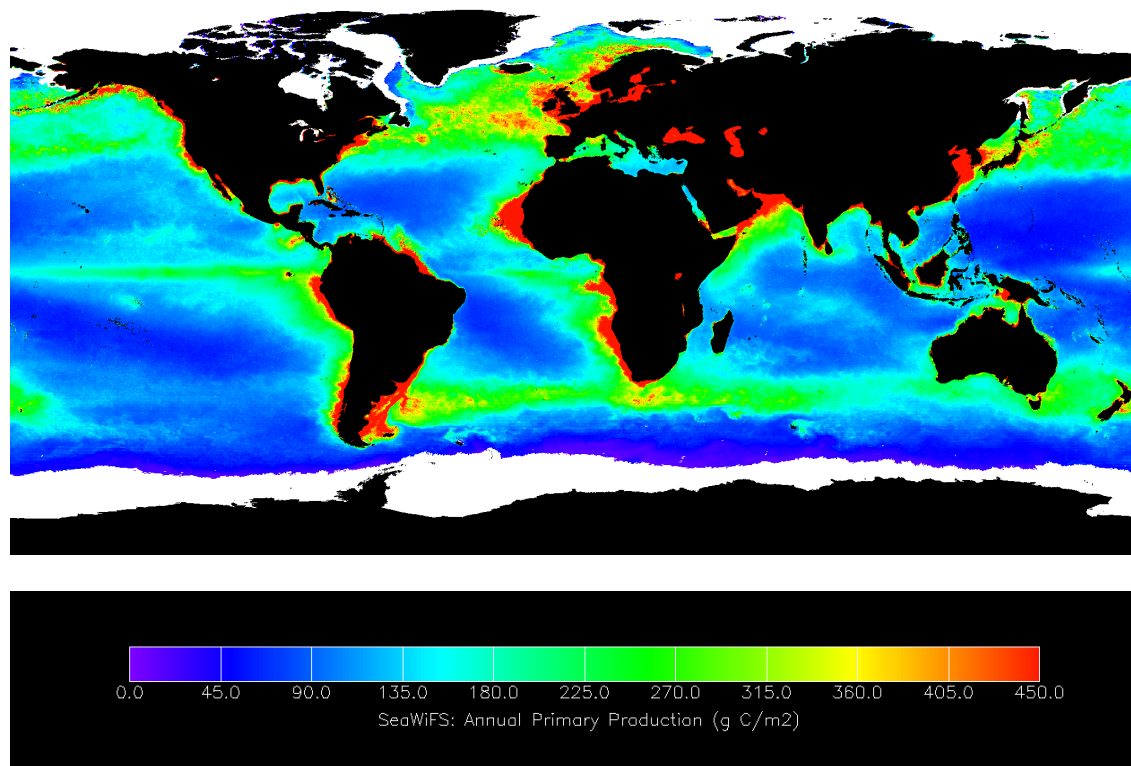


Fig. 2.2 – Produtividade média nos oceanos, calculada a partir de dados de satélite, para o período de um ano, de Setembro de 1998 a Agosto de 1999.

Além das estimativas de clorofila e produtividade primária, dados da cor de oceano constituem recurso vital para uma variedade de pesquisas oceanográficas e de ciências da Terra, como o desenvolvimento e movimentação de algas tóxicas (geralmente chamadas "marés vermelhas"), monitoramento da qualidade de água e mudanças na turbidez (Seawifis).

Juntamente com clorofila e a produtividade primária, as variáveis temperatura e elevação da superfície do mar, pressão atmosférica e ventos da superfície apresentam um complexo relacionamento entre si, contribuindo, de diferentes maneiras, para determinar a variabilidade ambiental no oceano.

O altímetro emite uma série de pulsos na vertical do satélite e registra os intervalos de tempo entre a emissão e a recepção dos sinais refletidos, bem como a forma e a amplitude dos

ecos. Isto permite obter informações sobre a distância satélite - oceano e sobre o estado do mar. Conhecida a distância satélite – superfície do mar, e com informações adicionais sobre a posição do satélite, a variabilidade da elevação da superfície pode ser estimada, com uma precisão que atualmente atinge 2 cm (em escala global). O conjunto completo de medições altimétricas é composto de elevação da superfície, altura significativa das ondas de superfície e velocidade do vento na superfície. Dados de altimetria tem sido regularmente obtidos para o mapeamento da topografia da superfície do mar, sendo atualmente utilizados dados dos satélites TOPEX / POSEIDON e JASON 1. A Figura 2.3 mostra exemplo do processamento desses dados, com a obtenção das anomalias instantâneas da elevação da superfície do mar no Atlântico Sul e Tropical.

Medições de radiância no infra-vermelho tem sido usadas desde 1970 para estimar a temperatura da superfície do mar por sensoriamento remoto. As estimativas são baseadas na física da radiação do corpo negro, considerando correções da atmosfera, identificação de regiões sem nuvens e transferência das medidas para coordenadas em terra. A National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) atualmente utiliza dois satélites de órbita polar, NOAA-12 e NOAA-14, para observações duas vezes ao dia em escala global. Esses satélites são equipados com Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), que monitora a superfície com resolução nadir de 1.1 km.

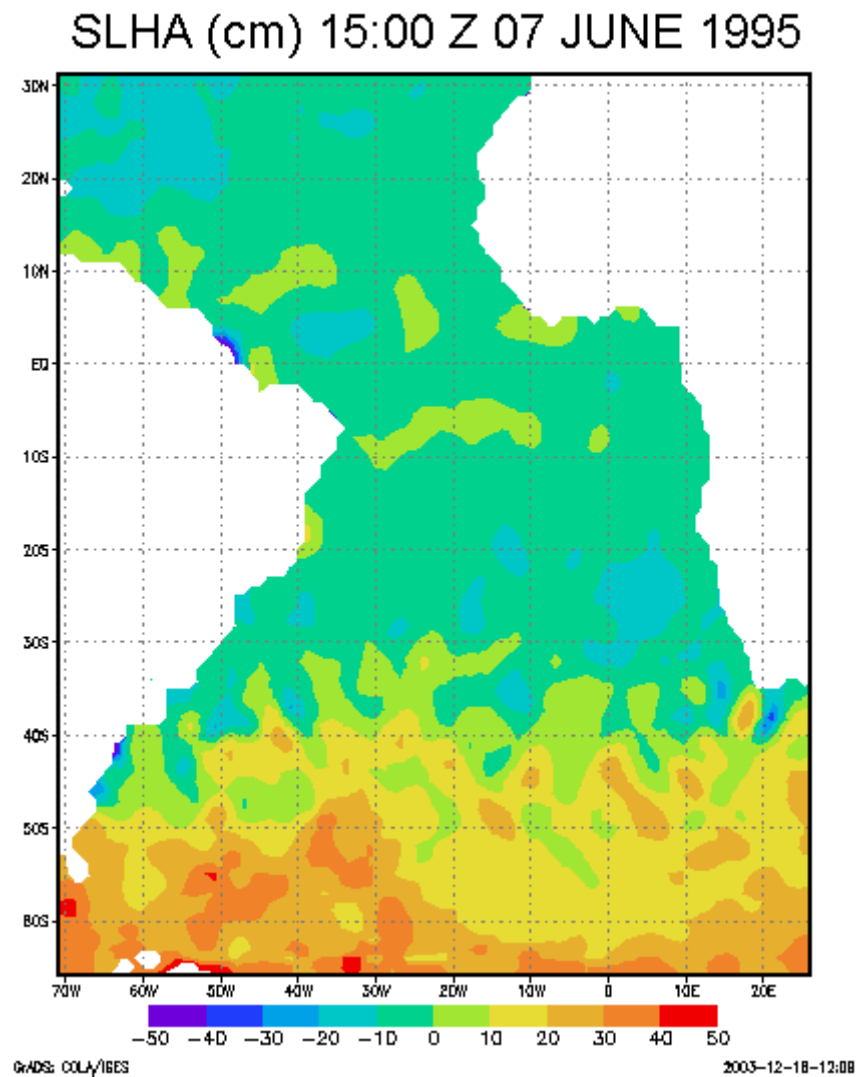


Fig. 2.3 – Anomalias instantâneas do nível da superfície do mar no Atlântico Sul e Tropical, calculadas a partir de dados de altimetria de satélite TOPEX / POSEIDON.

Como alternativa às medições remotas de elevação e temperatura do mar, podem ser usados resultados de modelos numéricos hidrodinâmicos, os quais utilizam as medições remotas para sua validação e calibração; no presente estudo, foi utilizada uma versão do), que foi desenvolvido por Alan F. Blumberg e George L. Mellor em 1977 e, desde então, tem sido utilizado por vários pesquisadores. Esse modelo resolve um conjunto de equações tridimensionais não-lineares por diferenças finitas, baseado em coordenadas verticais sigma, sendo aplicado para estudos da circulação em escalas espaciais desde bacias até domínios

locais, e em escalas de tempo variando de dias a décadas. O uso de coordenadas sigma é adequado a regiões com grande variação topográfica, pois permite a representação precisa de sua hidrodinâmica, tanto em meso-escala, como nas simulações pioneiras de BLUMBERG & MELLOR (1987), como também em domínios de grande escala, nos trabalhos de EZER & MELLOR (1994, 1997, 2000) para o Atlântico Norte.

Uma adaptação do POM foi feita por Joseph Harari (IO/USP) e Ricardo Camargo (IAG/USP), com o intuito de obter uma grade de alta resolução para o Atlântico Sul e Tropical, considerando simulações e previsões das circulações geradas por marés, ventos e variações de densidade. Essa versão tem sido utilizada com propósitos científico e operacional, permitindo o detalhamento da hidrodinâmica de qualquer subdomínio do Atlântico Sul e Tropical, através do aninhamento de grades, especialmente em regiões de plataforma continental e costeira (HARARI *et al.*, 2005; CAMARGO *et al.*, 2006).

Quanto a dados de vento e pressão atmosférica, constituem produtos das reanálises do NCEP / NCAR, disponíveis desde 1948, em cobertura global, com resolução de $2.5 \times 2.5^\circ$, em intervalos de 6 horas, desde a superfície até o nível de 10 hPa, em 28 níveis na vertical, donde foram extraídos apenas os dados referentes à superfície. As reanálises correspondem a uma composição de dados de várias fontes, tais como estações em terra, medidas de navios, observações de sondagens, medidas de satélites e resultados de modelos numéricos meteorológicos, os quais foram assimilados em um modelo de circulação geral da atmosfera (Kalnay *et al.*, 1990). Dessa forma, as reanálises do NCEP / NCAR oferecem uma oportunidade potencial de investigação da variabilidade de longo período do clima, em escala global.

Finalizando a revisão da literatura, deve se ressaltar que as análises das variabilidades ambientais e correlações têm grande complexidade, por ser um problema multidimensional,

com parâmetros que dependem de latitude, longitude e tempo, em várias escalas espaço - temporais.

III – DESCRIÇÃO METEORÓLOGICA, HIDRODINÂMICA E BIOLÓGICA DA REGIÃO DE ESTUDO

III.1 – Topografia e climatologia de superfície

O Oceano Atlântico é o mais rico dos oceanos mundiais no que se diz respeito à pesquisa oceanográfica. Dados de sua topografia, extensão, mares adjacentes e características variadas de suas águas em diferentes regiões o tornam a região oceânica mais pesquisada do mundo, segundo Tomzack (2002).

Os dados topográficos do Oceano Atlântico mostram características únicas que o diferem dos Oceanos Pacífico e Índico, tendo como destaque suas extensões, meridionais e zonais. Sua extensão meridional, de aproximadamente 21.000 Km, que se estende do Círculo Polar Ártico à região Antártica, e sua extensão zonal, compreendida do Golfo do México à costa noroeste da África, em torno de 8300 Km, compõe uma região de características singulares e importantíssima para a pesquisa mundial. O Oceano Atlântico possui o maior número de mares adjacentes, sendo estes responsáveis pela diversidade nas características de suas águas. Suas Bacias ocidentais e orientais são divididas em partes praticamente iguais, pela Cordilheira do Meio Atlântico, que na sua extensão ocasiona grande efeito na circulação das águas profundas.

O Oceano Atlântico cobre uma área de $106,6 \times 10^6 \text{ Km}^2$, incluindo todos seus mares adjacentes, tendo uma extensão de 74.10^6 km^2 quando se refere só à parte do Oceano Atlântico Sul. A profundidade média do Oceano Atlântico é 3300 m, e embora tenha muitas bacias abissais com profundidades entre 5000m a 6000m, a média é menor que dos Oceanos Pacífico e Índico.

Analisando a Figura 3.1, se podem constatar algumas características fundamentais. A primeira delas é a grande diferença entre a profundidade a leste e a oeste da Cordilheira Meso Atlântica a 30°S. A oeste se encontra o Rio Grande Rise e o Rio Grande Gap que permite a

passagem de águas profundas, em torno de 4400 m. No lado leste a Walvis Ridge, que não atinge 700 m de profundidade, bloqueia o fluxo na profundidade de 4000 m. A segunda característica está relacionada à posição da Romanche Fracture Zone, que fica a 20 km ao norte do equador, que permite a circulação de água entre o oeste e o Leste da profunda bacia, aproximadamente a 4500 m, sendo a única chance da água proveniente do sul romper a barreira colocada pela Cordilheira Meso Atlântica. A Gibbs Fracture Zone, a 53°N, constitui a terceira característica, que permite passagem da água no nível dos 3000 m.

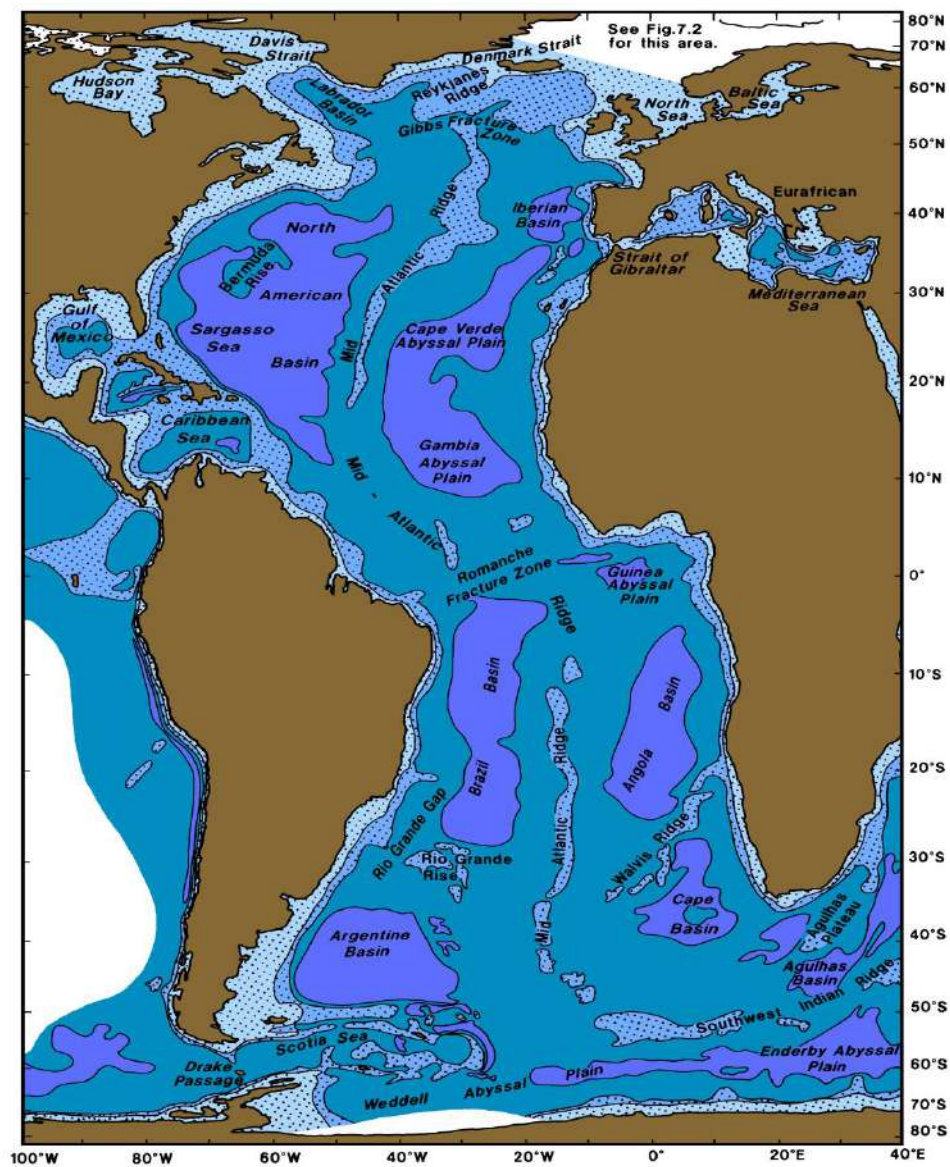
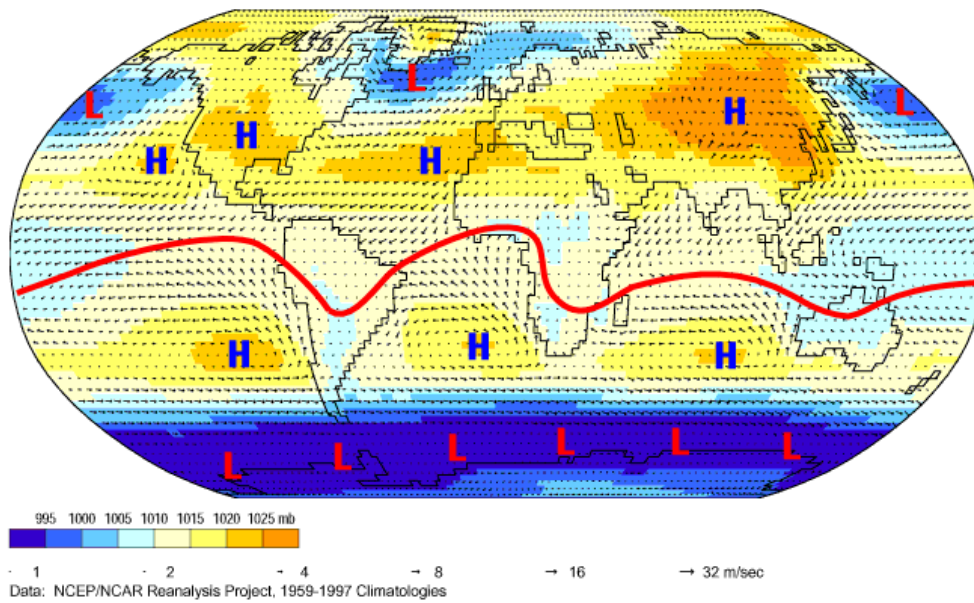


Fig 3.1 – Batimetria do Oceano Atlântico, com as isóbatas de 1000, 3000 e 5000 m; regiões com menos de 3000 m de profundidade são hachuradas (retirada do livro Tomzack,2002)

Sea-Level Pressure and Surface Winds

Jan



Sea-Level Pressure and Surface Winds

Jul

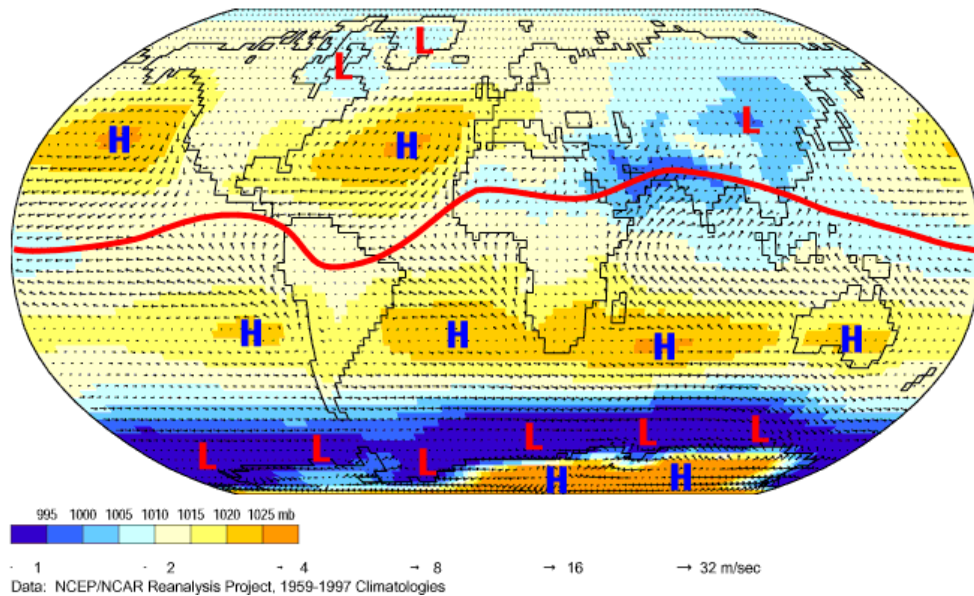


Fig. 3.2- Mapas globais de pressão atmosférica e ventos ao nível do mar climatológicos, em janeiro e julho.

Em relação ao regime de ventos do Oceano Atlântico, se tem muitos aspectos importantes, como mostrado na Figura 3.2, com os mapas de pressão atmosférica e ventos na superfície médios de janeiro e julho. Esses mapas foram obtidos a partir das reanálises do

NCEP / NCAR para o período de 1959 – 1997 e demonstram, para o Atlântico, as posições dos centros de alta pressão subtropicais (High, H) e os giros dos ventos ao seu redor, bem como as posições médias da Zona de Convergência Inter-tropical (ZCIT, traço vermelho), que definem as distribuições dos ventos nas baixas latitudes; no Oceano Atlântico, também são notáveis os centros de baixa pressão (Low, L), especialmente nas altas latitudes. A grande variação sazonal dos ventos no Atlântico Norte em comparação com a baixa variabilidade do campo de vento na zona subtropical do Atlântico Sul é uma das principais características do regime de ventos. O cinturão de alta pressão subtropical, que ocorre no inverno (austral) ao norte da Flórida – Bermudas, em toda a região das Ilhas Canárias, Açores e Madeira e se prolonga atravessando o Saara e o Mar Mediterrâneo, é reduzido durante o verão para o centro de uma célula de alta pressão perto dos Açores; este fenômeno é conhecido como Alta dos Açores, que define a meteorologia do verão europeu, com ventos moderados no Oceano Atlântico Norte. No inverno, ocorre um encontro de massas de ar, entre o ar frio da Sibéria e o ar mais aquecido vindo da advecção das águas quentes da região da Corrente Norueguesa, levando ao desenvolvimento da conhecida Baixa da Islândia, com seus fortes ventos, que seguem as isóbaras entre o cinturão subtropical de alta pressão e o de baixa pressão ao norte.

A perturbação sazonal do cinturão de alta pressão subtropical do Atlântico Sul é muito menos desenvolvida, e mostra que a oeste do centro a variação é ainda menor. A distribuição de ventos do Oceano Atlântico Sul tem como destaque os máximos de ventos zonais em torno de 50°S e os máximos de ventos alíseos nas baixas latitudes (Figura 3.2).

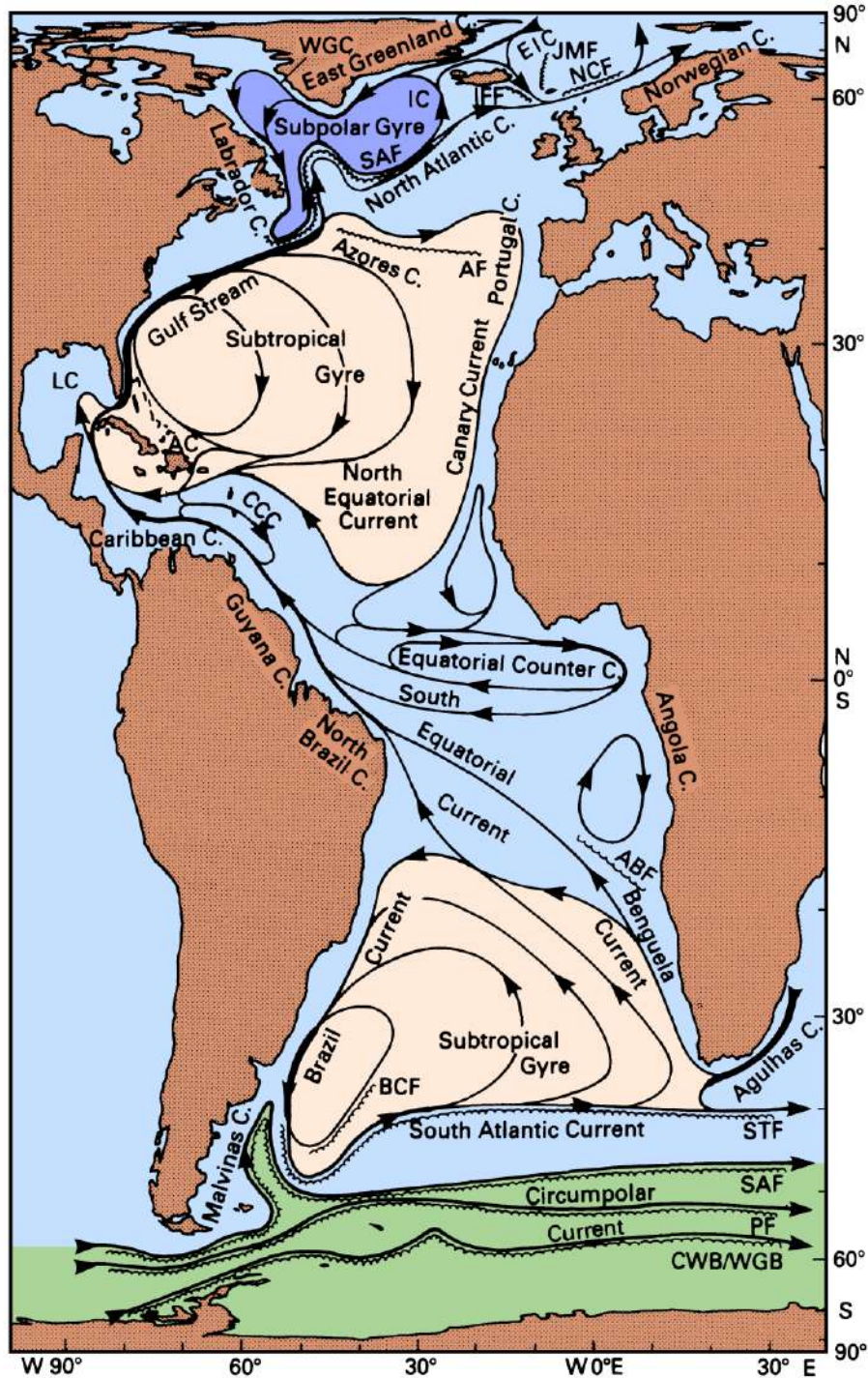


Fig. 3.3. As correntes da superfície do Oceano Atlântico. Abreviaturas são usadas para as Correntes da Islândia Leste (EIC), Irminger (IC), Oeste da Groenlândia (WGC), Antilhas (AC) e Contra Corrente do Caribe (CCC). Outras abreviações referem-se às frentes: JMF: Frente Jan Mayen, NCF: Frente da Noruega, IFF: Frente Islândia - Ilhas Faroé, SAF: Frente Subarctic, AF: Frente dos Açores, ABF: Frente Angola - Benguela, BCF: Frente da Corrente do Brasil, STF: Frente Subtropical, SAF: Frente Subantártica, PF: Frente Polar, CWB / WGB: Fronteira da Água Continental / Giro de Weddell. Adaptado de Duncan et al. (1982), Krauss (1986) e Peterson e Stramma (1991).

III.2- Padrões de circulação oceânica no Atlântico Sul e Tropical

As águas superficiais do Atlântico Sul têm como característica um grande giro de circulação chamado de giro subtropical, localizado em latitudes subtropicais, que é limitado ao norte pela Corrente Sul Equatorial (CSE) e ao sul pela Corrente do Atlântico Sul (CAS).

Segundo a Figura 3.3, quando a Corrente Sul Equatorial (CSE) se aproxima da costa brasileira de forma bem estratificada sofrendo uma bifurcação, passando a assumir diferentes níveis de profundidade, em diferentes latitudes. Em torno de 15°S, a corrente se mantém superficial e resulta em duas correntes de contorno oeste que fluem junto à costa brasileira, sendo a Corrente Norte do Brasil (CNB) para o norte e a Corrente do Brasil (CB) para o sul. Num corte vertical da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), a bifurcação ocorre por volta de 20°S, onde parte dela flui para o norte, acompanhando a Corrente de Contorno Intermediária (CCI), contribuindo com a formação da Sub-corrente Norte do Brasil (SNB), e parte vai para o sul, tornando mais espesso na vertical o fluxo da CB (Figura 3.4).

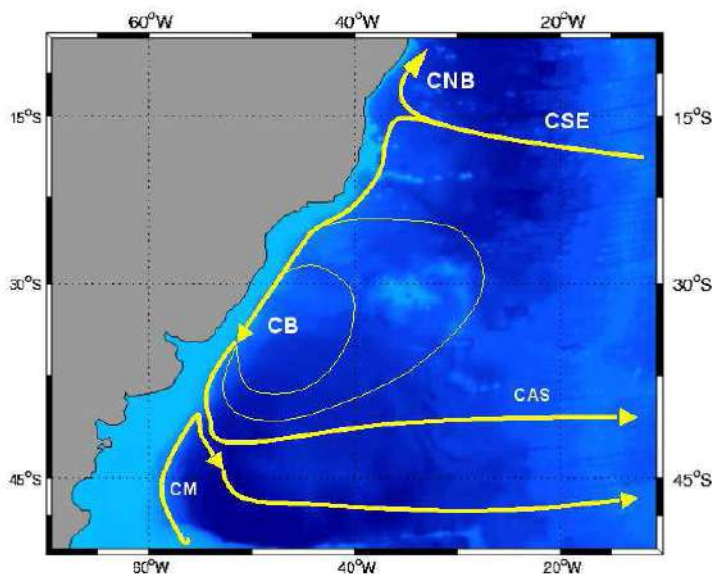


Fig. 3.4 - Padrões de circulação de larga escala em superfície para o Atlântico Sul. Extraído de Stramma & England (1999).

A estrutura vertical de massas de água no Atlântico tropical é composta, nos primeiros três quilômetros por Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA), Água Circumpolar Superior e Água Profunda do Atlântico Norte (APAN).

No Atlântico Tropical encontra-se uma camada de água oceânica quente e muito salina, chamada de Água Tropical (AT), que tem salinidade máxima na sub-superfície e a área de sua formação está localizada nas áreas oceânicas de baixas latitudes do Atlântico Sul, tendo como características principais a intensa radiação solar e evaporação com pouca precipitação desta região. A literatura define como índices termohalinos da AT as temperaturas superiores a 20°C e salinidades maiores que 36. (Silveira et al., 2000)

Em níveis picnoclínicos, ou seja, abaixo da camada de mistura, nos domínios verticais da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), o giro se dá de maneira um pouco diferente.

Na região de confluência entre as águas da CB e da Corrente das Malvinas se forma a ACAS, num grande processo de mistura e turbulência vertical; a ACAS se espalha ao longo da superfície de densidade adequada ao seu ajustamento hidrostático e acaba fluindo em nível picnoclínico junto com a CAS, incorporando o giro. Paralelamente, acompanha a CSE, só que no ponto em que ela atinge a costa brasileira seu comportamento é diferente e incerto do ponto de vista da meso-escala, mas padrões de larga escala mostram que isto ocorre nos entornos de 20°S, como mostra a Figura 3.5. A ACAS é caracterizada por temperaturas maiores que 6°C e menores que 20°C e salinidades entre 34,6 e 36.

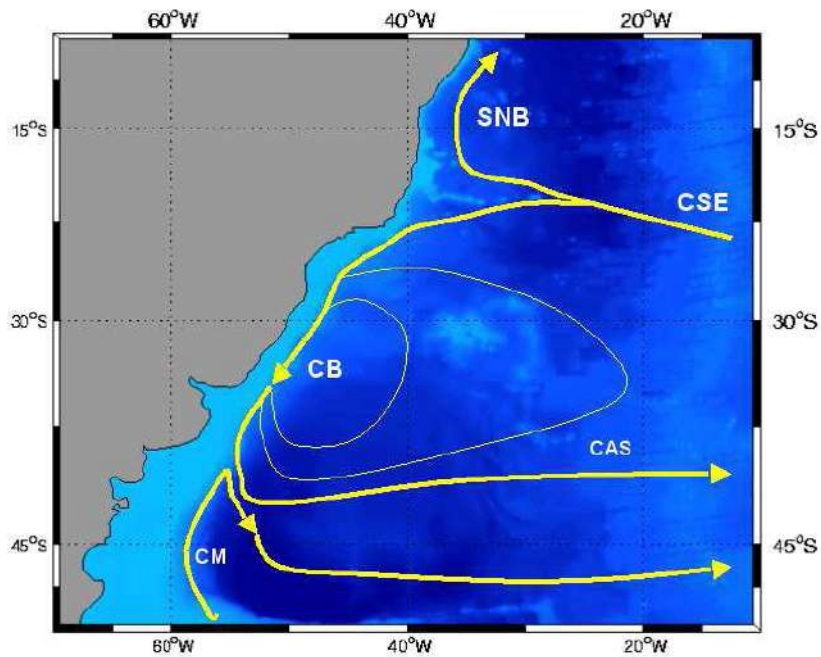
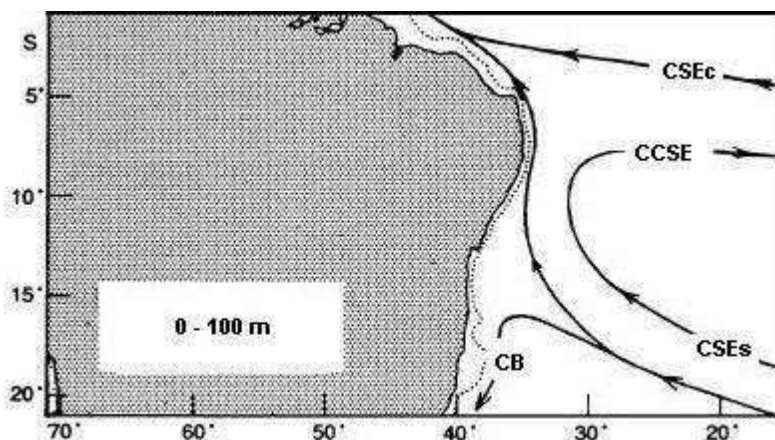


Fig. 3.5: Padrões de circulação de larga-escala ao nível de 200 metros para o Atlântico Sul. Adaptado de Stramma & England (1999).

O fluxo da CSE tem três ramos principais: ramo Norte, ramo Central e ramo Sul. O ramo Sul alimenta e forma o fluxo da Corrente Norte do Brasil (CNB) fluindo para o norte junto ao talude continental e a CB fluindo para o sul. Isto ocorre, de acordo com os padrões de larga escala, nos entornos de 15°S, segundo a Figura 3.6 (Stramma, 1991).



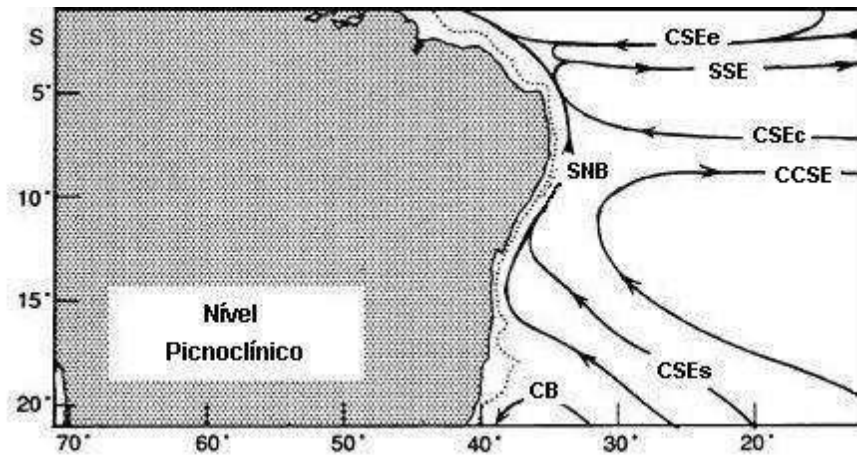


Fig. 3.6: Representação esquemática da circulação no Oceano Atlântico Sul, entre 0°e 20°S. Painel superior: 0 a 100 m de profundidade; painel inferior: Em nível picnoclínico. Adaptado de Stramma & Schott (1999).

Segundo Stramma (1991) a Corrente do Brasil (CB) fecha o contorno oeste do Giro Subtropical do Atlântico Sul, fluindo ao largo da costa leste e sudeste brasileira. Ela tem sua origem no ramo sul da bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE), considerando que não se conhece ainda ao certo, em meso-escala, a latitude na qual isto ocorre; apenas infere-se que, por padrões de larga escala, ocorre nas imediações de 15°S. A CB, desde o seu sítio de formação até a latitude de convergência subtropical, flui junto ao talude e conflui com a Corrente das Malvinas, e se separando então da costa (Silveira et al., 2000).

O “Sistema Corrente do Brasil”, ou “Sistema CB/CCI” é um padrão de circulação que apresenta na sua maior parte de extensão, em níveis picnoclínicos, outra corrente de contorno oeste, transportando a AIA, chamada de Corrente de Contorno Intermediária (CCI). Para Boebel et al. (1999) não se sabe ao certo a área onde o escoamento da CCI começa na costa brasileira, mas existem evidências da presença de AIA fluindo para sul na Bacia de Santos, em torno de 30°S, mas para Muller et al. (1998) a AIA flui rumo ao equador, ao norte de 25°S.

A Figura 3.7 resume o que ocorre na região com o Sistema Corrente do Brasil: o fluxo da CB se torna mais raso ao norte de 20°S; a CCI recebe contribuição de ACAS do ramo sul

da CSE e torna-se a SNB, com núcleo em subsuperfície, porém já transportando para o norte as três massas de água: AT, ACAS e AIA.

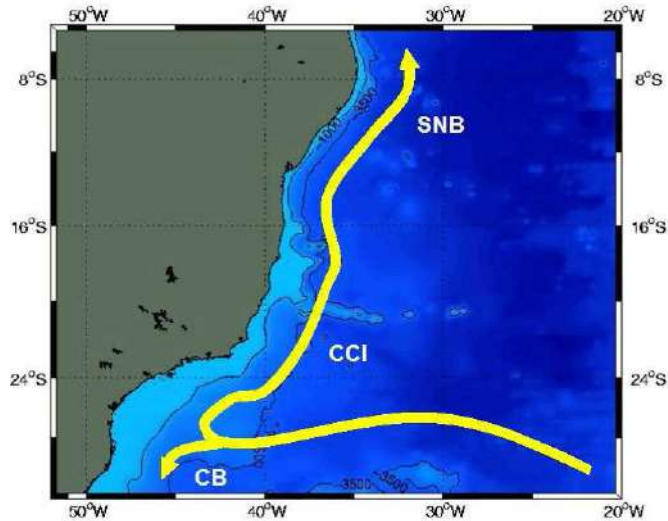


Fig. 3.7: Representação esquemática da circulação no Oceano Atlântico Sudoeste a 800 m de profundidade. Adaptado de Silveira et al AP Soutelino. (2000).

Segundo Silveira et al (2000), existe a Corrente de Contorno Profunda (CCP), que flui em profundidades superiores a 2000 m transportando a APAN, que é originada no Atlântico Norte e cruza todo o oceano seguindo o ramo inferior da circulação termohalina, se afastando da costa na Convergência Subtropical.(Figura 3.8)

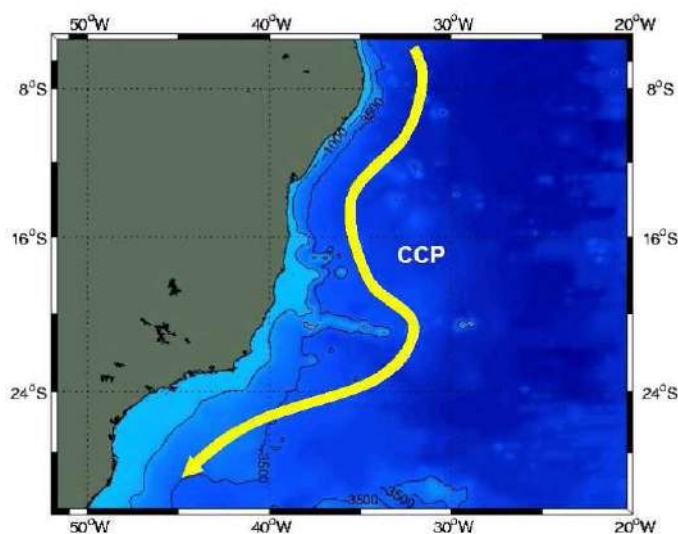


Fig.3.8: Representação esquemática da circulação a 2000-2500 m no Oceano Atlântico Sul. Adaptado de Silveira et al. (2000).

III.3 – Produtividade primária e a importância do fitoplâncton

A superfície do nosso planeta parece um tapete recheado de vida e é nos oceanos que encontramos 99% da presença de vida, seja animal ou vegetal. A maioria da vida na Terra necessita das plantas para que o ciclo chamado cadeia alimentar aconteça harmoniosamente. No caso dos oceanos, o fitoplâncton é a primeira ligação dessa correia fotorreceptora responsável pela alimentação dos seres vivos marinhos.

Segundo TUNDISI (1976), a produção primária refere-se à fixação de carbono inorgânico e à produção líquida, ou bruta, de matéria orgânica a partir da fotossíntese. Dentre os fatores importantes relacionados à produtividade primária, a disponibilidade de nutrientes e a intensidade luminosa são fundamentais para otimizar a produção de biomassa em ecossistemas aquáticos. Assim, a dinâmica dos compostos orgânicos e inorgânicos tem um papel fundamental na produtividade em diversos ecossistemas marinhos. Sua permanência e regeneração em lagunas costeiras, estuários e baías está estreitamente relacionada com sua hidrografia, principalmente pela ação das marés e a incidência de ventos (BUSTILLOS-GUZMÁN *et al.* citado por LÓPEZ-CORTÉS *ET al.*,1999). Contudo, o próprio funcionamento do ecossistema faz com que outras variáveis sejam consideradas, principalmente fatores físicos, como a salinidade e a temperatura.

Dado que toda a produção orgânica de um ecossistema aquático depende dos organismos fotossintetizantes, é fundamental que se considere a medida desta produção como o ponto de partida inicial para uma avaliação sobre o potencial sustentável do mesmo (TUNDISI, 1976). Além disso, corpos de água tropicais respondem a mudanças ambientais a curto prazo. Forças climáticas e meteorológicas, como episódios anômalos de intensa precipitação ou seca, ciclos relativos aos rios e as marés, a ação de ventos fortes, etc ... podem

afetar rapidamente o processo biogeoquímico (KNOPPERS citado por SOUZA, COUTO, 1999).

O estudo dos processos físico-químicos de um ecossistema é de grande importância para que se venha a ratificar as conclusões obtidas com a análise da produtividade primária. A junção entre fatores ambientais e produção primária é essencial para o entendimento do funcionamento de ecossistemas aquáticos (HERRERASILVEIRA, 1998). O complexo de características físicas, químicas e biológicas controla a dinâmica da comunidade de fitoplâncton do ambiente, determinando a composição das espécies, a biomassa e a produtividade primária (CHIU *et al.*, 1994).

Desta forma, o entendimento sobre o fitoplâncton, sua composição, sua formação, quantidades presentes em regiões oceânicas, revela as relações entre os fenômenos oceânicos e atmosféricos.

O fitoplâncton, minúsculas plantas que seguem o curso das correntes oceânicas, possui papel importantíssimo para a vida neste planeta. Sem o desenvolvimento dessas “plantas flutuantes sobre o mar”, o desenvolvimento do ciclo de vida do mar e do planeta ficaria comprometido, já que, para cada 5 cm³ de água do mar, se tem em torno de um milhão de células de fitoplâncton. O fitoplâncton existente no mundo gera pelo menos 50% do ar que respiramos, produzido através da realização da fotossíntese. Essa quantidade de oxigênio, em relação aos 99,9% de todo o dióxido de carbono que foi armazenado em sedimentos marinhos, no decorrer de todo o tempo da escala geológica, faz com que o papel do fitoplâncton tenha uma grande importância como regulador na quantidade de carbono na atmosfera, ou seja, um papel principal no ciclo de carbono global (Seawifis).

O fitoplâncton é composto por algas microscópicas unicelulares, que contêm clorofila *a*, tal como as plantas terrestres. Tem a capacidade, através do processo da fotossíntese, de captar a energia solar sob a forma de luz e de a converter em energia química e de transformar

a matéria inorgânica em matéria orgânica, a partir do CO_2 , da água e dos nutrientes dissolvidos, liberando-se oxigênio. A fotossíntese marinha é a fonte de toda a vida oceânica e o fitoplâncton constitui o primeiro e quantitativamente mais importante dos elos da cadeia biológica dos mares e oceanos (Seawifis).

O ciclo de vida do fitoplâncton inicia-se na superfície das águas, onde crescem com muita facilidade, pois não há falta de água e há um grande recebimento de energia luminosa que favorece seu desenvolvimento. O dióxido de carbono é abundante no oceano e sempre que a fonte nas águas de superfície vai para baixo, porque o fitoplâncton a usou durante a fotossíntese, é reabastecido da atmosfera acima. No oceano, o fator principal que limita o crescimento do fitoplâncton é a disponibilidade dos nutrientes. Nutrientes (nitratos, fosfatos, silicatos, etc..) são encontrados em quantidades grandes nas maiores profundidades (e águas mais frias do oceano). Sempre que as águas são trazidas para perto da superfície, pelo fenômeno da ressurgência, os oceanos são fertilizados para ajudar no crescimento dos fitoplânctons (Seawifis).

Dessa forma, o crescimento do fitoplâncton depende da luz solar, água e nutrientes para sobreviver. Qualquer mudança que altere as propriedades físicas e químicas em uma determinada região do oceano irá afetar as concentrações de fitoplâncton nesta região. Populações desta planta marinha vão crescer ou diminuir rapidamente em resposta a mudanças no seu ambiente. Alterações nas tendências de uma dada população de fitoplâncton, tais como a sua densidade, distribuição real e a taxa de crescimento ou diminuição da população, vão alertar os cientistas que as condições ambientais estão mudando na referida região. As análises destas mudanças podem ajudar os cientistas a observar e compreender as alterações climáticas e ambientais ocorridas (Seawifis).

Para os olhos humanos, o oceano aparece como tons de azul ou verde-azulado. Mas, do espaço exterior, sensores de satélite conseguem distinguir mesmo ligeiras variações de cor

mesmo para que os nossos olhos não sejam suficientemente sensíveis. Diferentes tons da cor do oceano revelam a presença de diferentes concentrações de sedimentos, materiais orgânicos ou mesmo de fitoplâncton, os quais podem ser medidos por satélites (Seawifis).

Devido a seus pigmentos de clorofila, o fitoplâncton absorve preferencialmente as partes vermelhas e azuis do espectro da luz (para a fotossíntese) e reflete a luz verde. O princípio básico pelo qual os satélites detectam a cor do oceano se resume em, se as águas apresentam maior quantidade de fitoplâncton, mais verde ela é, quanto menor a quantidade de fitoplâncton, é mais azul (Seawifis).

Nem todos os fitoplâncton são verdes. Eles vêm em uma variedade de formas e cores e, embora na maioria sejam inofensivos, alguns podem florescer em enorme quantidade e produzir toxinas que podem ser bastante prejudiciais à vida marinha e, em alguns casos, para os seres humanos também. Quando o crescimento do fitoplâncton é estimulado por um excesso de nutrientes provenientes de certas fontes, como a descarga de esgoto ou escoamento de fertilizantes agrícolas utilizados em terra, as conseqüências podem ser bastante graves. Grandes densidades desses fitoplânctons podem bloquear a luz solar de chegar ao fundo em áreas rasas das baías ou estuários e podem causar o declínio na vegetação submersa. Essas gramíneas são berçários vitais para muitas espécies de peixes e invertebrados e sua perda pode ter terríveis resultados ecológicos. Além disso, quando essas algas morrem e o plâncton afunda, sua decomposição em matéria orgânica retira o oxigênio da água. Lembrando, também, que peixes, mariscos e outros seres vivos necessitam de oxigênio para sobreviver, isto pode ocasionar problemas biológicos significativos (Seawifis).

A produtividade primária em geral é máxima na desembocadura de grandes rios, em áreas de ressurgência costeira e plataformas continentais extensas. A Figura 2.2 demonstra que, no Atlântico Sul e Tropical, os máximos de produtividade primária são encontrados na Foz do Amazonas e área oceânica adjacente, na Foz do Rio da Prata e na extensa plataforma

continental adjacente da Argentina, bem como em várias áreas de ressurgência costeira ao longo do contorno leste do oceano, ao longo da África. Após esses máximos de PPL, se tem valores relativamente altos nas áreas onde fluem a Corrente do Atlântico Sul e a Corrente de Benguela (Figura 2.2).

IV – MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada no presente estudo consistiu em:

1. Obter séries espaço-temporais de variáveis biológicas, físicas e meteorológicas, a partir de medições por sensoriamento remoto e resultados de modelos (meteorológico global e oceânico de grande escala);
2. Entender a estrutura destes parâmetros e suas variabilidades espaço-temporais; e
3. Determinar as correlações entre as variáveis biológicas, físicas e meteorológicas, por meio de técnicas estatísticas.

Os dados biológicos utilizados nesse trabalho são de clorofila *a* e produtividade primária líquida (PPL), sendo o último calculado por três algoritmos: 1) Vertically Generalized Production Model (VGPM) , um algoritmo descrito primeiramente por BEHRENFELD & FALKOWSKI (1997), em que a produtividade primária líquida varia linearmente com a concentração de clorofila; 2) Eppley-VGPM , um modelo híbrido que emprega a estrutura básica e parametrização do VGPM, mas substitui a descrição polinomial do Máximo Diário da Produção Primária Líquida pela relação exponencial descrita por MOREL (1991) e se baseia na equação da curva de temperatura em função do crescimento descrita por EPPLEY (1972); e 3) Carbon-based Productivity Model (CbPM) , um modelo primeiramente descrito por BEHRENFELD et al. (2005) e que foi recentemente expandido por WESTBERRY et al. (2006), passando a considerar a atenuação da luz ao penetrar na zona eufótica pelo modelo espectral.

Os dados de clorofila e PPL correspondem a médias mensais e foram considerados para o período de Janeiro de 2004 a Dezembro de 2006, em grade de $1/6^\circ \times 1/6^\circ$, sendo provenientes de sensoriamento remoto, através do sensor MODIS, e disponibilizados pela Oregon State University (OSU, EUA) em sua base de dados de produtividade oceânica, que

se encontra no site:

<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity>

Os dados do modelo meteorológico de interesse para este projeto são a pressão atmosférica e ventos ao nível de superfície, gerados pelo modelo do NCAR / NCEP, em grade global de 2,5° x 2,5°, a intervalos de 6 horas, sendo disponibilizados no site

www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtm

Os dados oceanográficos são provenientes de previsão operacional, executada através de uma versão do POM, descrita por HARARI *et al.* (2005), em grade com 0,5° x 0,5°, com resultados horários. Os dados desse modelo oceânico podem ser obtidos no site:

<http://master.iag.usp.br/ind.php?inic=00&prod=ondas> .

Todos os dados biológicos, meteorológicos e oceanográficos foram portanto considerados na forma de médias mensais para os anos de 2004 a 2006, no Oceano Atlântico Sul e Tropical, entre as longitudes 70 ° W - 25 ° E e as latitudes 85 ° S - 30 ° N, interpolados para intervalos de 0,5 ° x 0,5 ° em latitude e longitude.

Os dados de modelagem e de sensoriamento remoto foram processados utilizando softwares escritos em linguagem MATLAB 7,3, a partir do ordenamento dos valores médios mensais para toda a região de interesse, na forma de séries temporais para cada ponto de grade; com o software, mapas de distribuição espacial foram obtidos (por mês) e os parâmetros estatísticos foram computados nos pontos selecionados, como médias, desvios padrão e valores extremos de cada série temporal. O software também calcula os coeficientes de correlação (no domínio do tempo e no domínio da frequência), para os três anos de análise, entre as variáveis físicas e biológicas, para todos os pontos da grade, permitindo a produção de mapas de distribuição espacial destas correlações para todo o Atlântico Sul e Tropical.

V – RESULTADOS E DISCUSSÕES

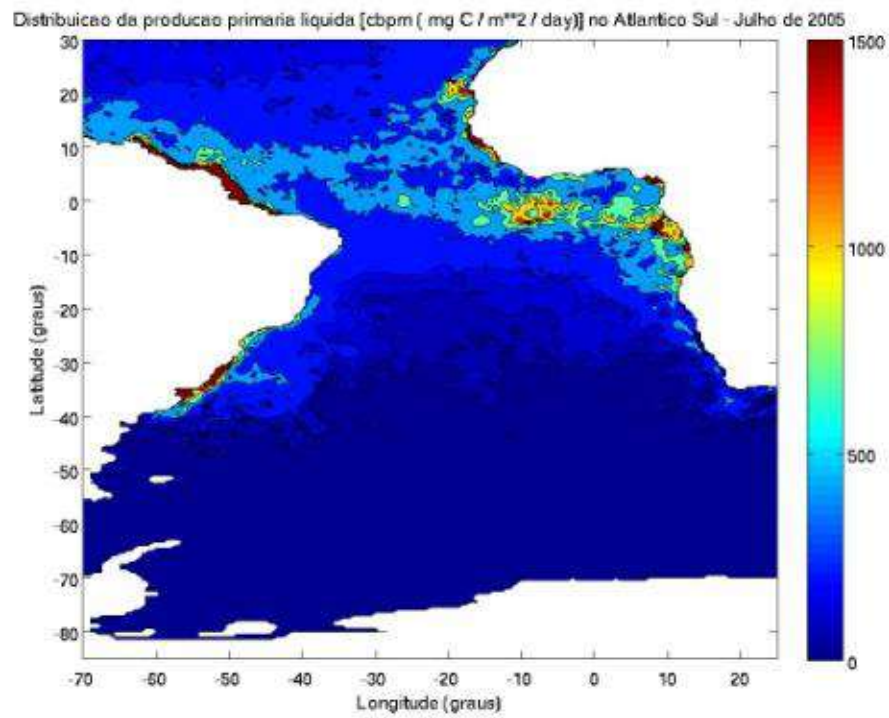
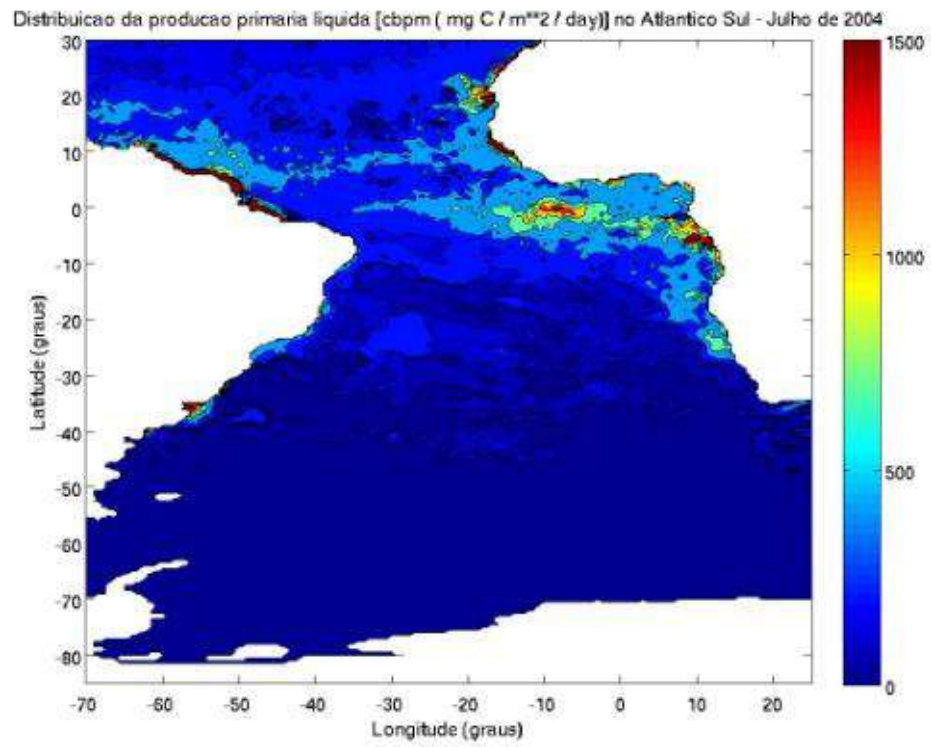
V.1 – Caracterização das variáveis físicas e biológicas

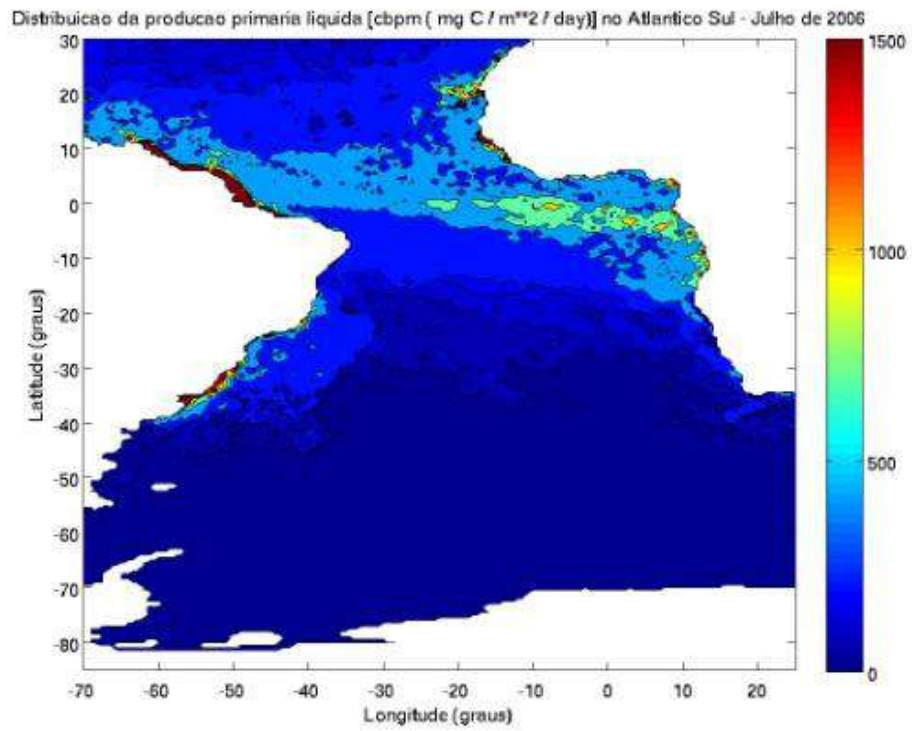
Os resultados dos processamentos serão apresentados na forma gráfica, com mapas das distribuições para os meses de Julho e Dezembro de 2004 a 2006, cujas características sintetizam as estações de inverno e verão (no hemisfério Sul), bem como o comportamento das propriedades ao longo do ano.

V.2 - Produtividade primária líquida e clorofila a

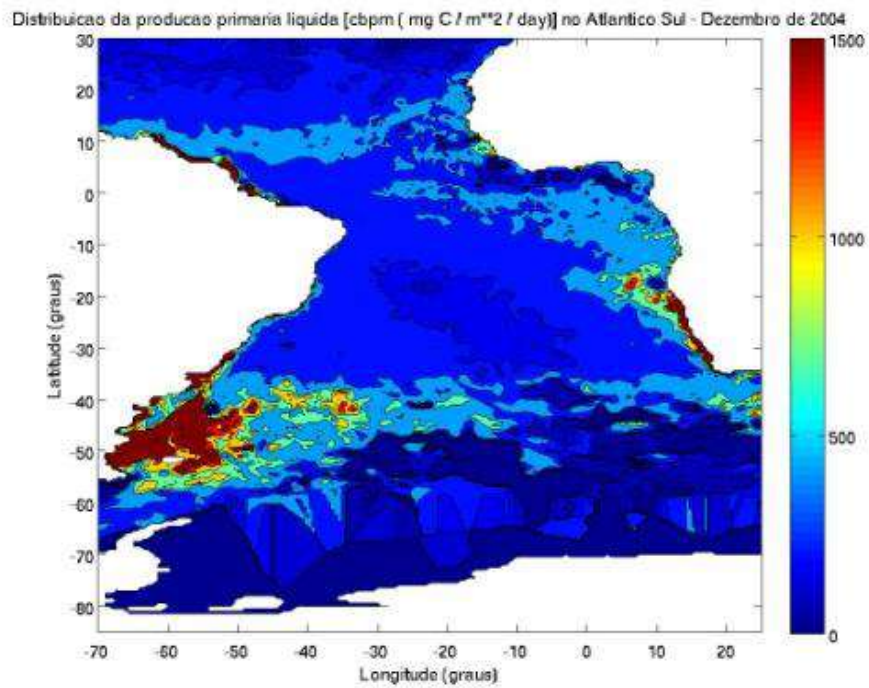
Analisando as distribuições de produtividade líquida calculada por Cbpm no Atlântico Sul e Tropical, se nota que a mesma apresenta padrões sazonais e características muito singulares.

As distribuições de produtividade primária líquida no Atlântico Sul e Tropical em julho, nos anos de 2004 a 2006, apresentam uma grande concentração na região equatorial, entre as latitudes 10°S e 10°N, principalmente próximo à costa, na desembocadura de rios, tanto na costa sul-americana como também próximo ao continente africano (Figura 5.1). Já no mês de dezembro, se nota uma grande produtividade primária na latitude de 50°S, especialmente próximo à costa, na região da Confluência Brasil-Malvinas, e havendo próximo ao continente africano uma produtividade primária ligeiramente menor (Figura 5.1).





(a)



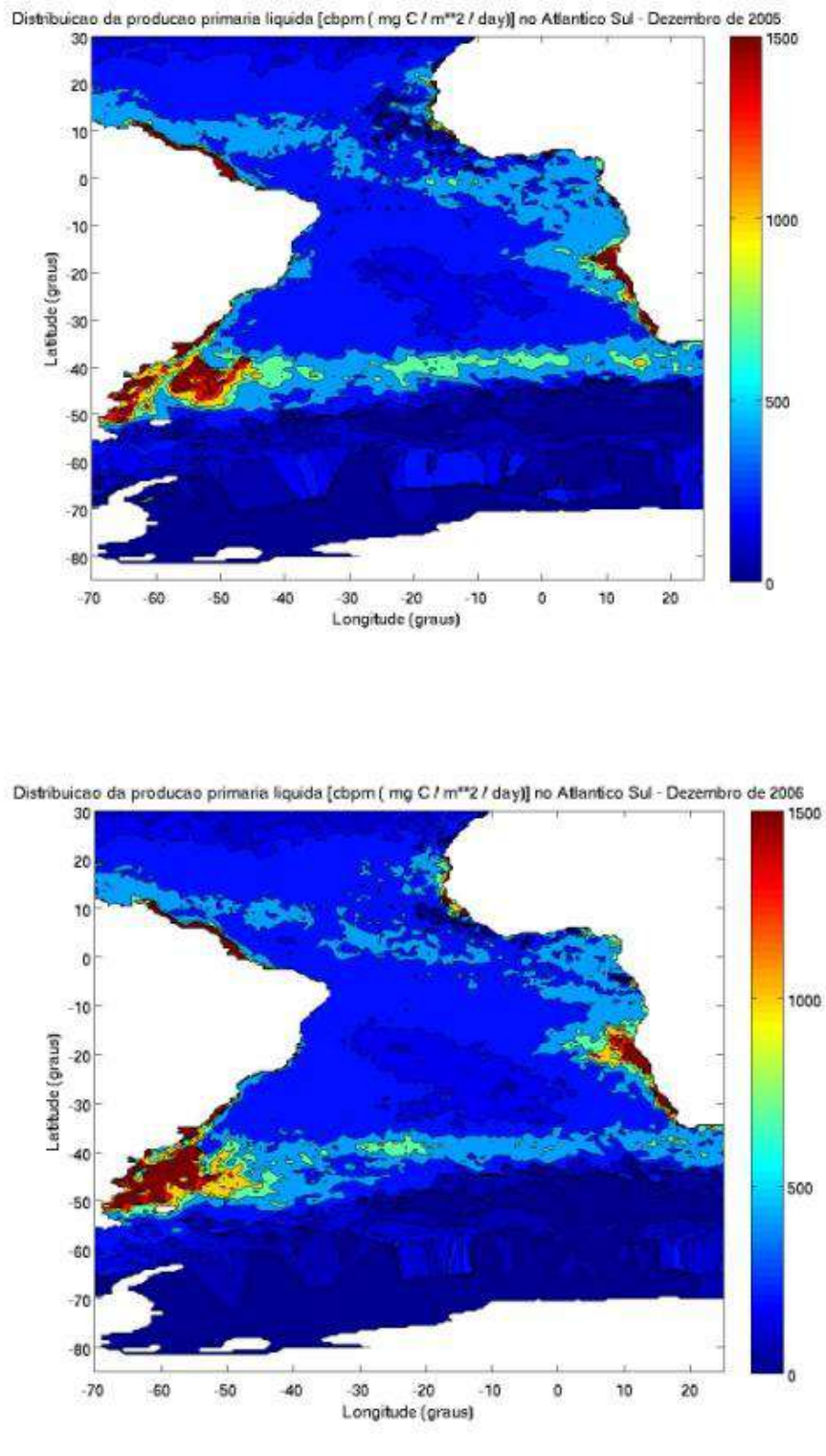
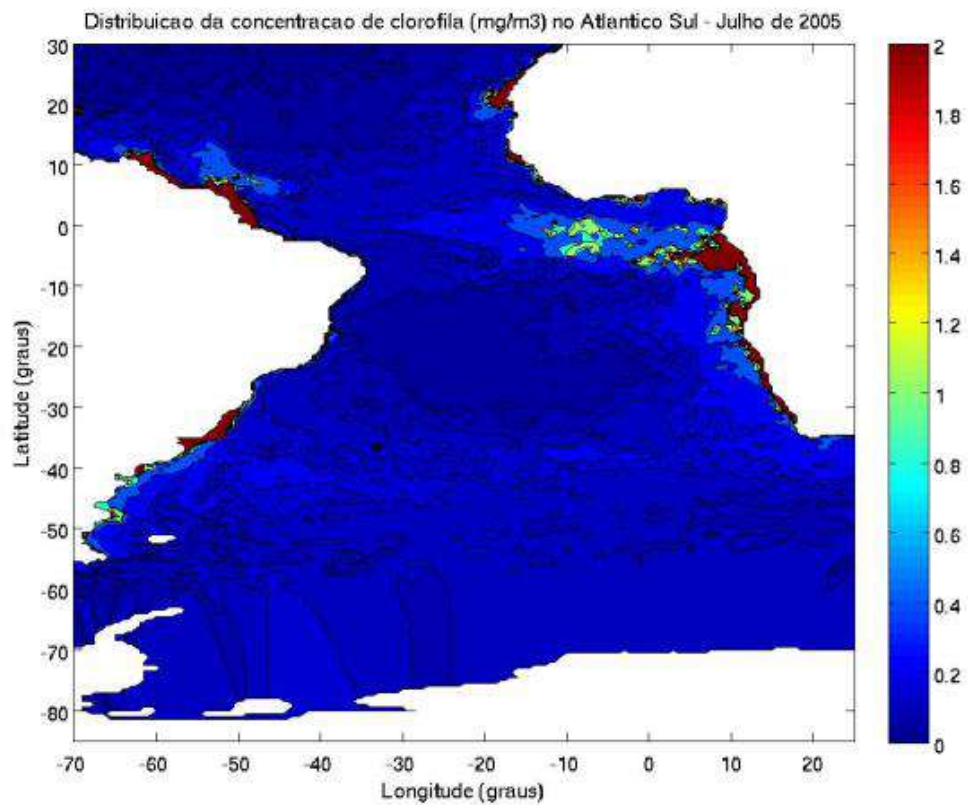
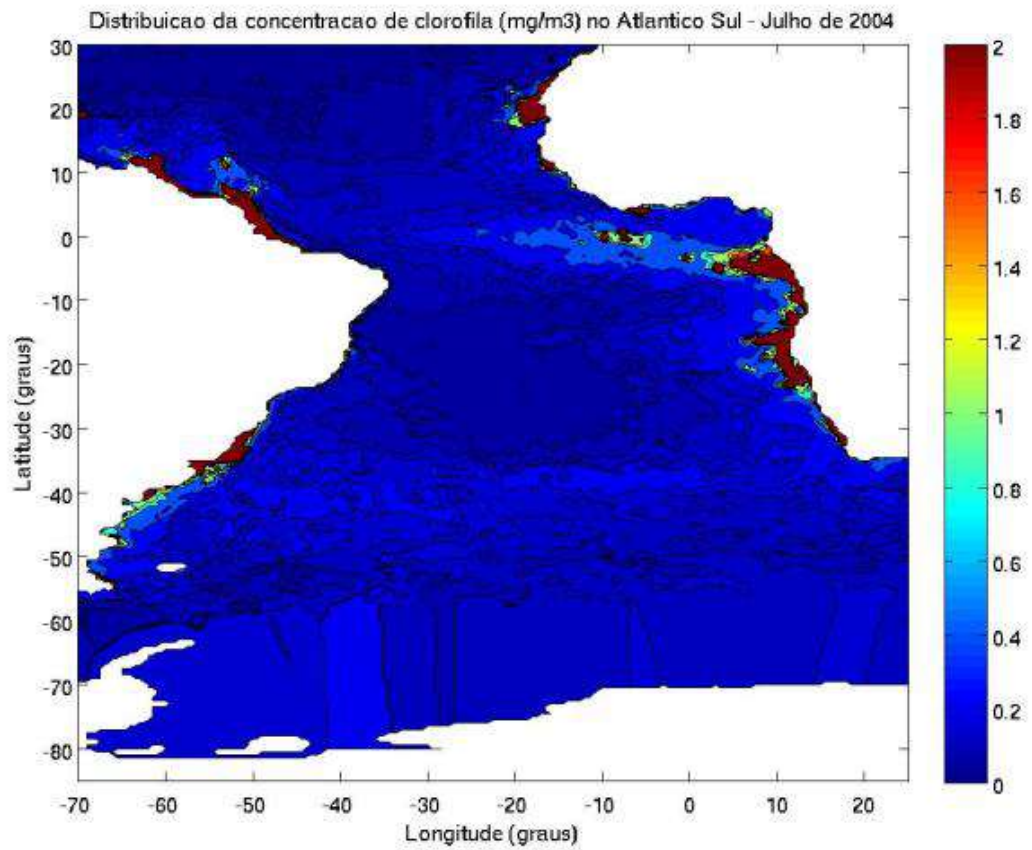
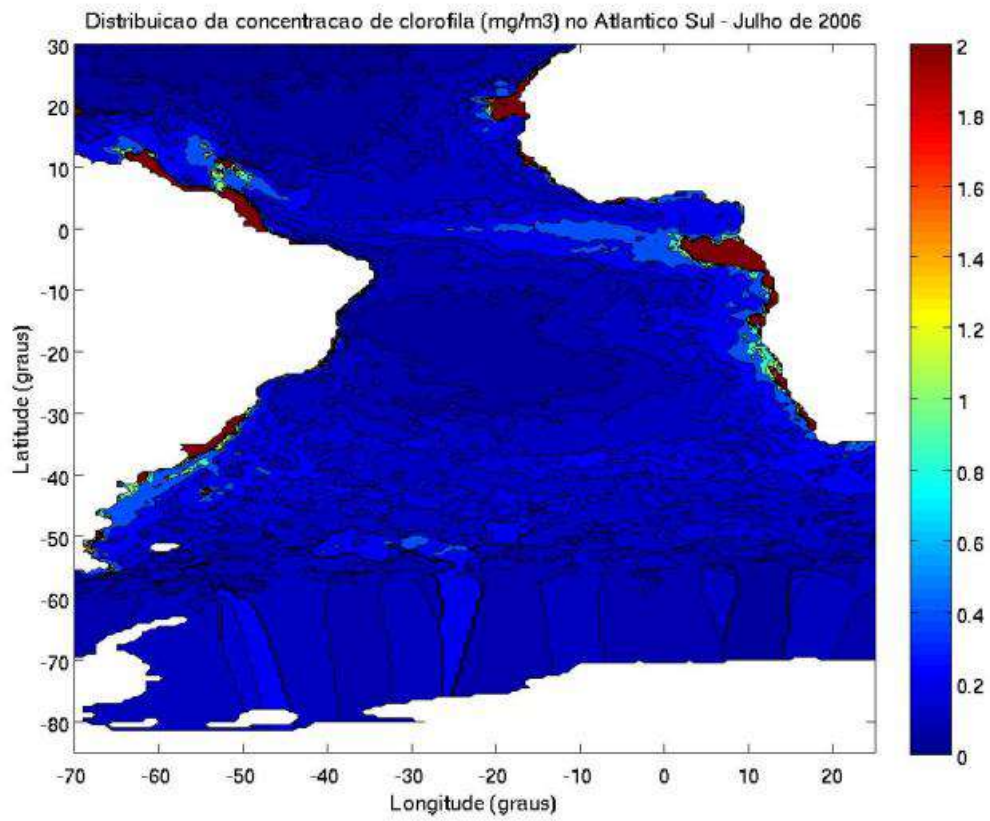


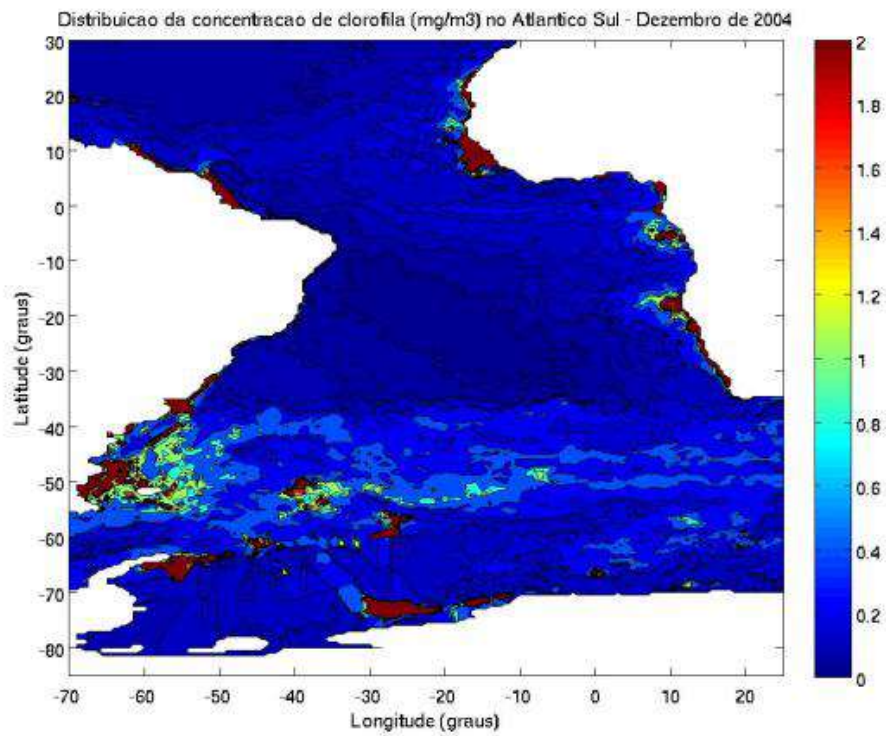
Fig. 5.1- Distribuições da produção primária calculada por CbPM, na superfície do Atlântico Sul e Tropical, em 2004, 2005 e 2006, nos meses de julho (a) e dezembro (b), em $\text{mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

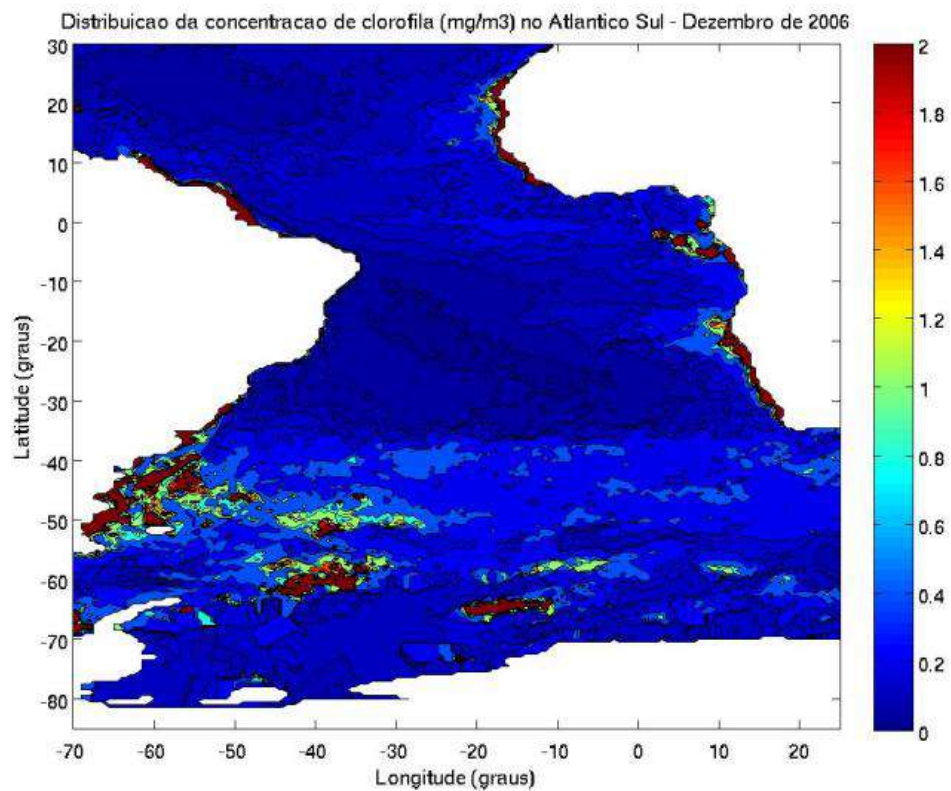
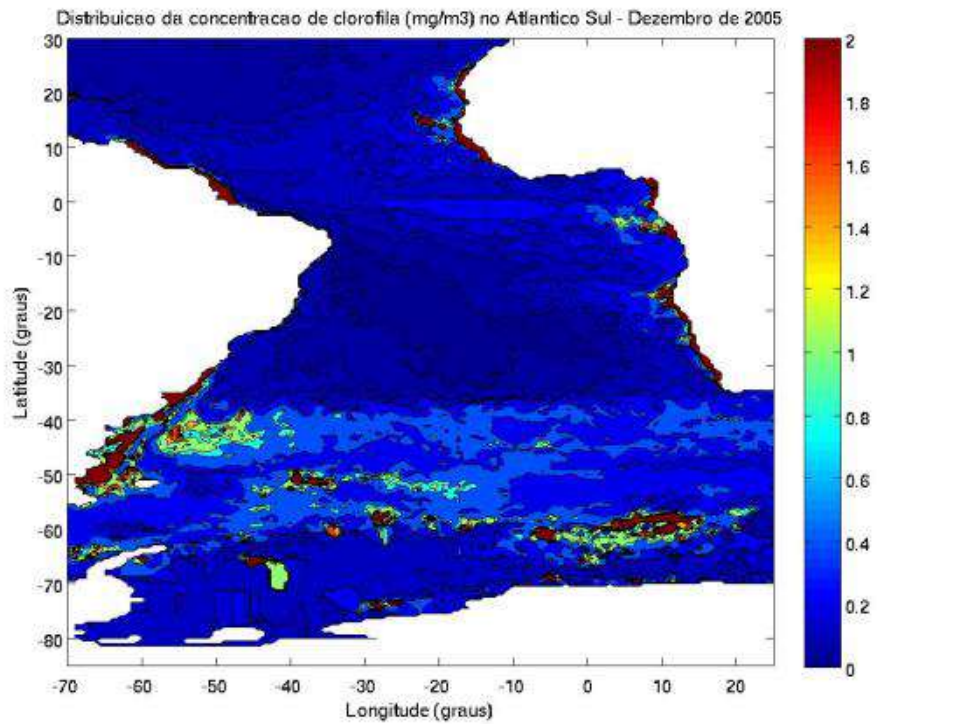
As distribuições das concentrações de clorofila *a* no Atlântico Sul e Tropical também são marcadas pela variação sazonal (Figura 5.2); no inverno (julho), as distribuições são mais elevadas nas regiões costeiras, especialmente próximo à foz de grandes rios; no verão (dezembro), as distribuições mostram altos valores também nas regiões de ressurgência e confluência de correntes, bem como em altas latitudes.





(a)

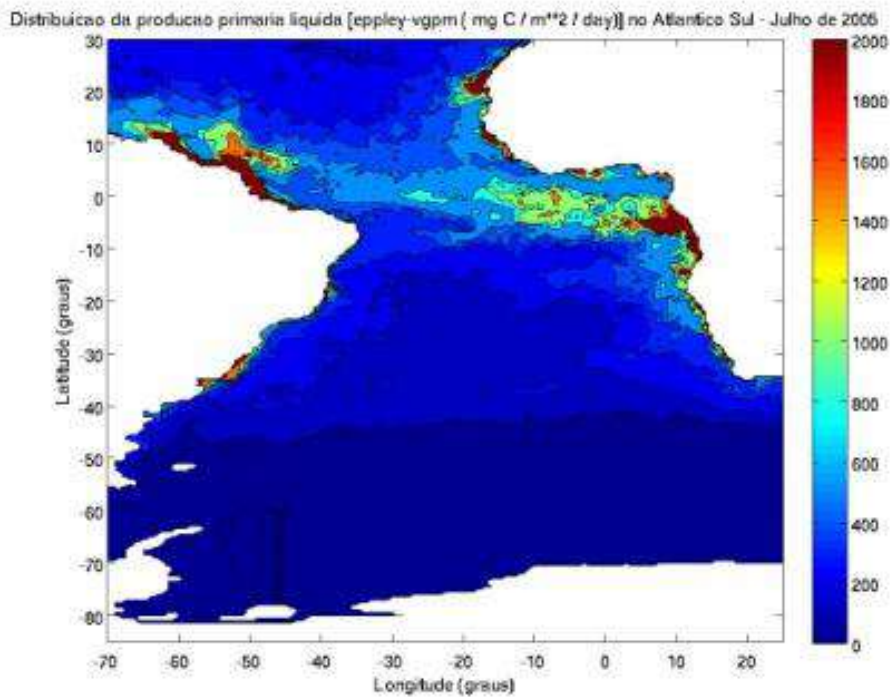
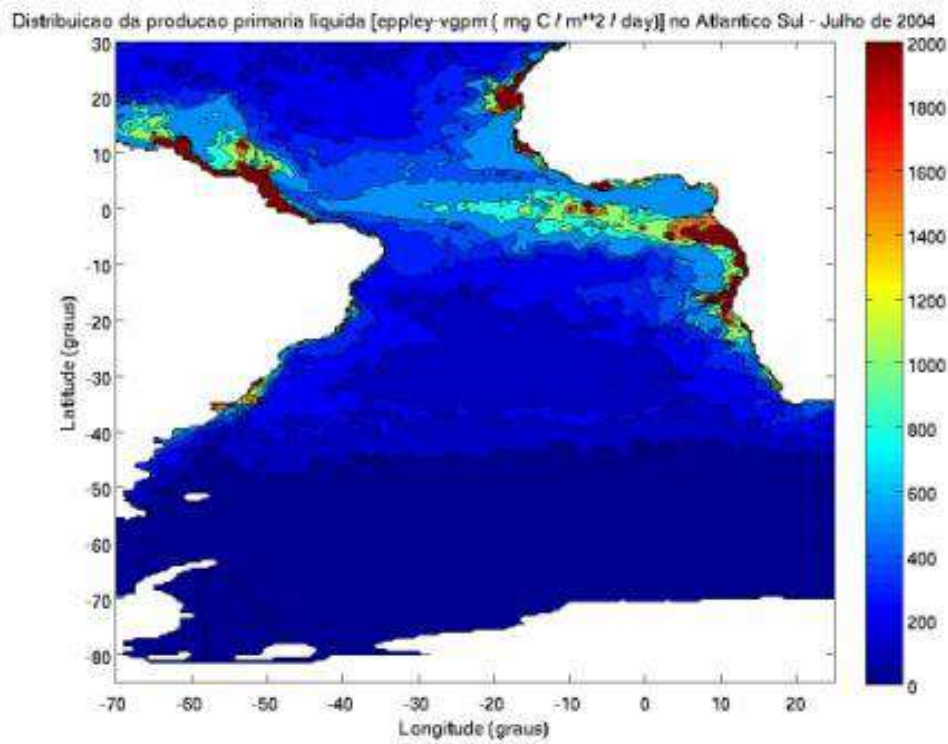


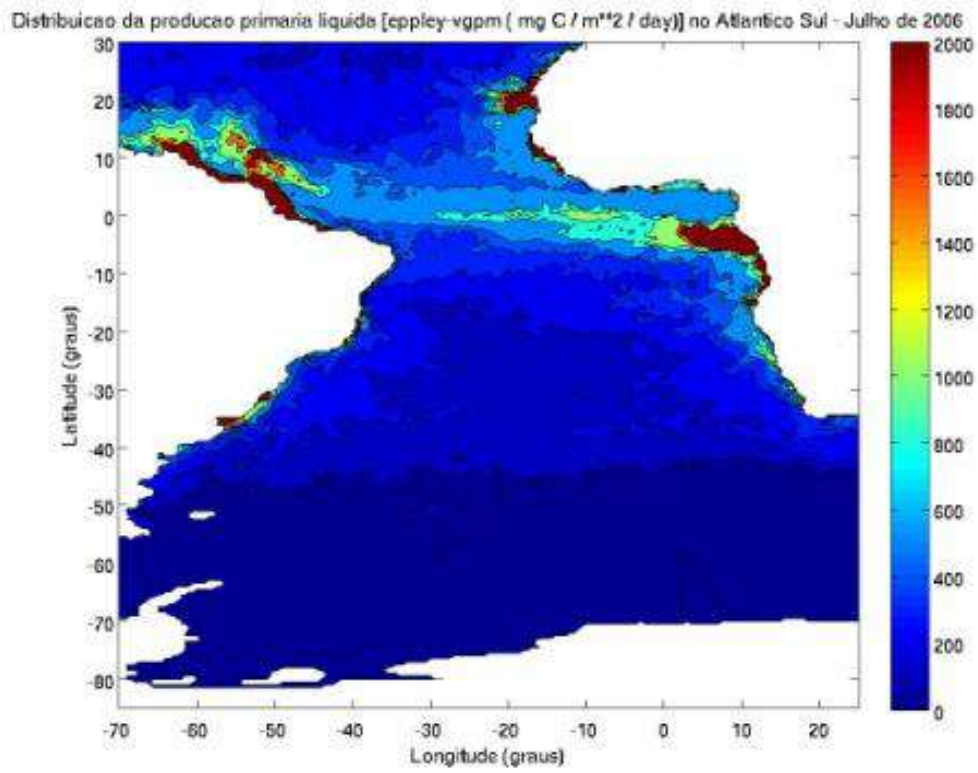


(b)

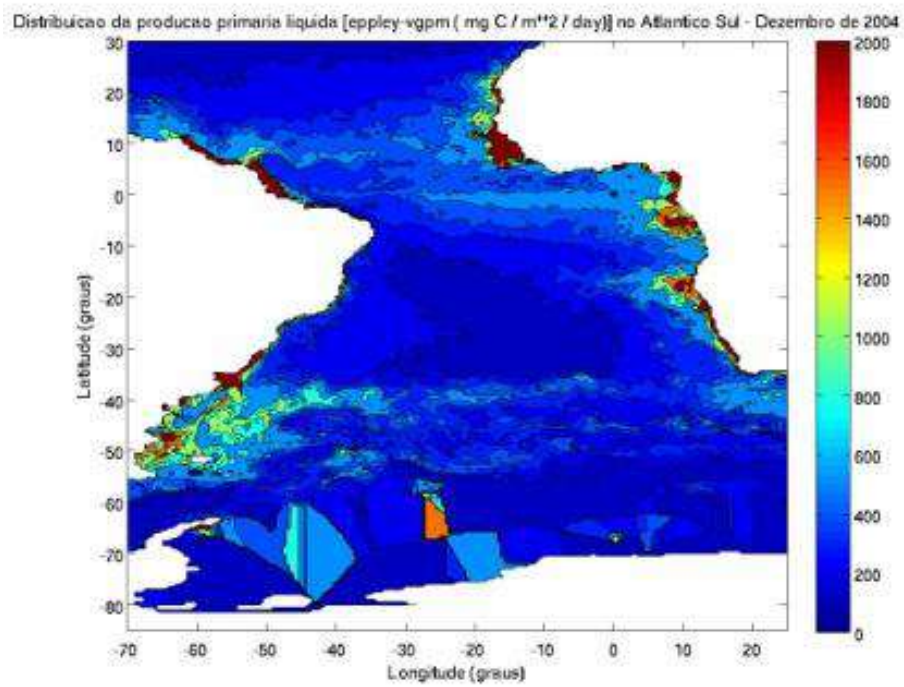
Fig. 5.2- Distribuições das concentrações de clorofila a na superfície do Atlântico Sul e Tropical nos meses de julho (a) e dezembro (b), nos anos de 2004 a 2006, em mg/m³.

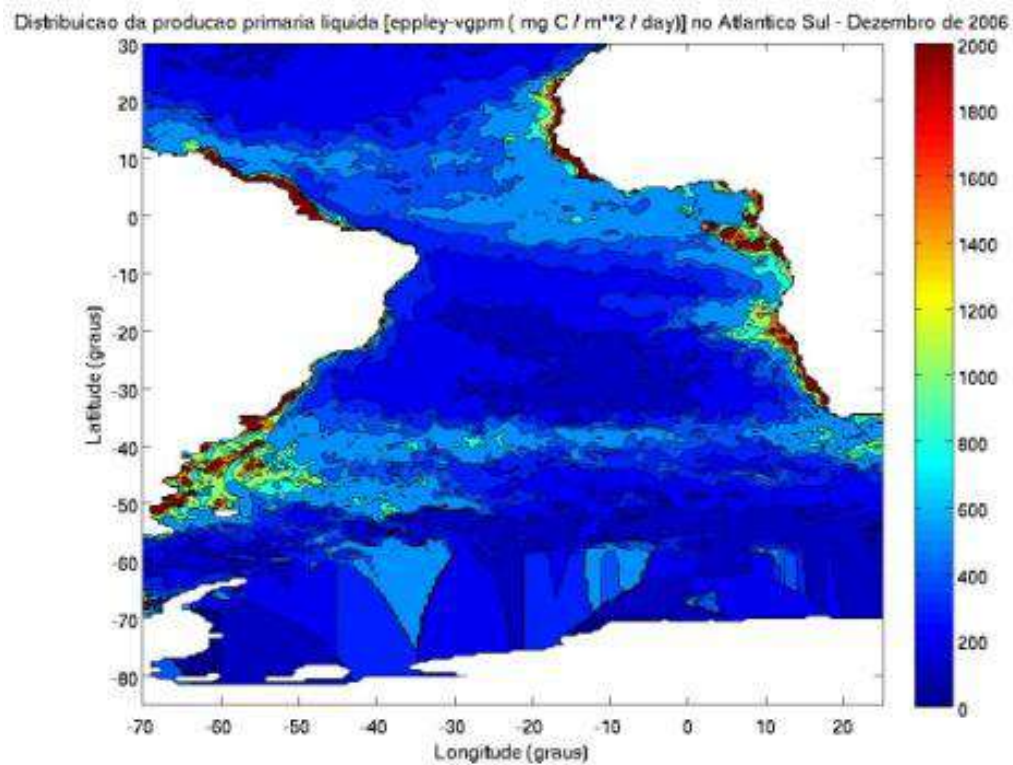
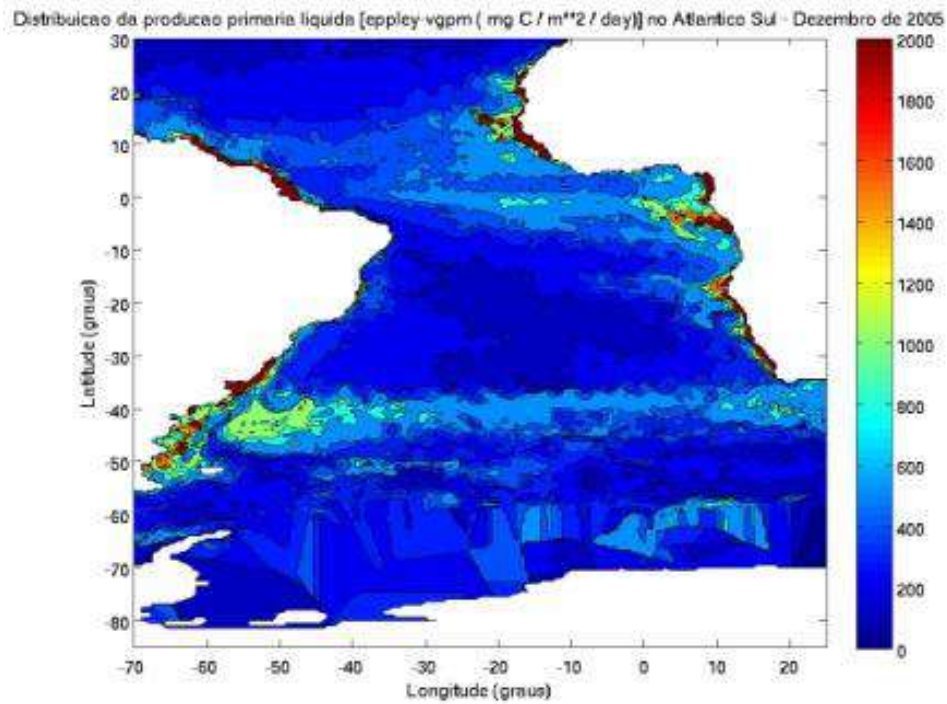
O padrão de variabilidade sazonal obtido para o modelo CbPM (FIGURA 5.1) se repete nas análises de julho-dezembro de produtividade primária calculada pelos demais métodos, de forma que as distribuições resultantes dos três tipos de algoritmos são muito semelhantes, mas havendo grandes variações de magnitude. De fato, na distribuição da produção primária por CbPM (FIGURA 5.1), os valores máximos oscilam em torno de 1500 $\text{mg.C.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, enquanto que na distribuição por Eppley-VGPM os máximos são por volta de 2000 $\text{mg.C.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (FIGURA 5.3) e por VGPM em torno de 2500 $\text{mg.C.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (FIGURA 5.4). Note-se que a escala de concentrações para o cálculo da produção com CbPM é linear, enquanto que as escalas para as demais concentrações são logarítmicas.





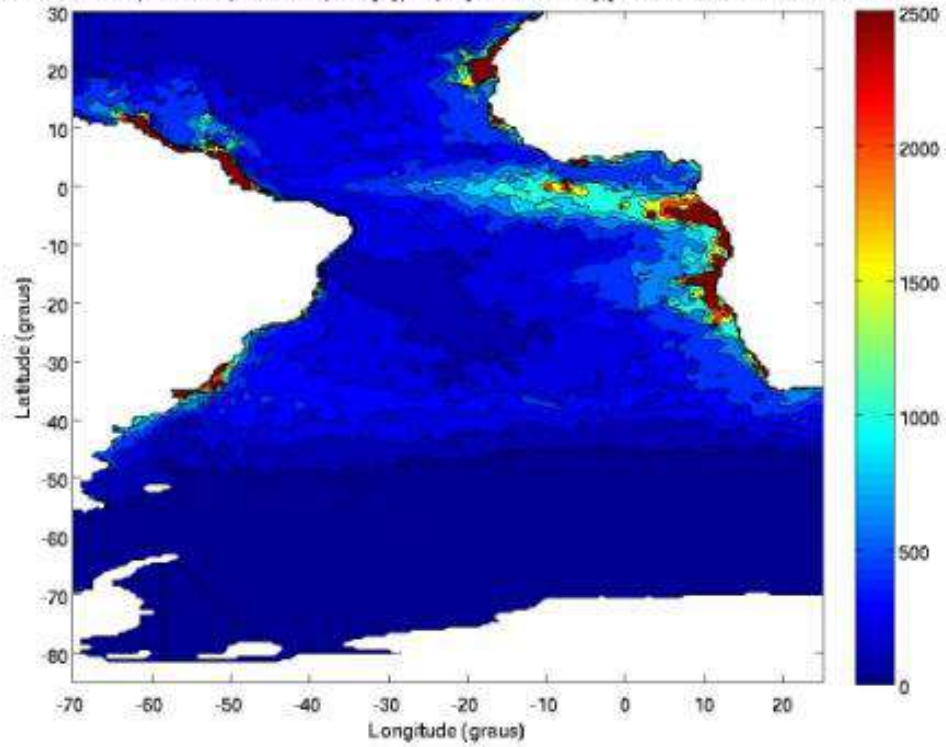
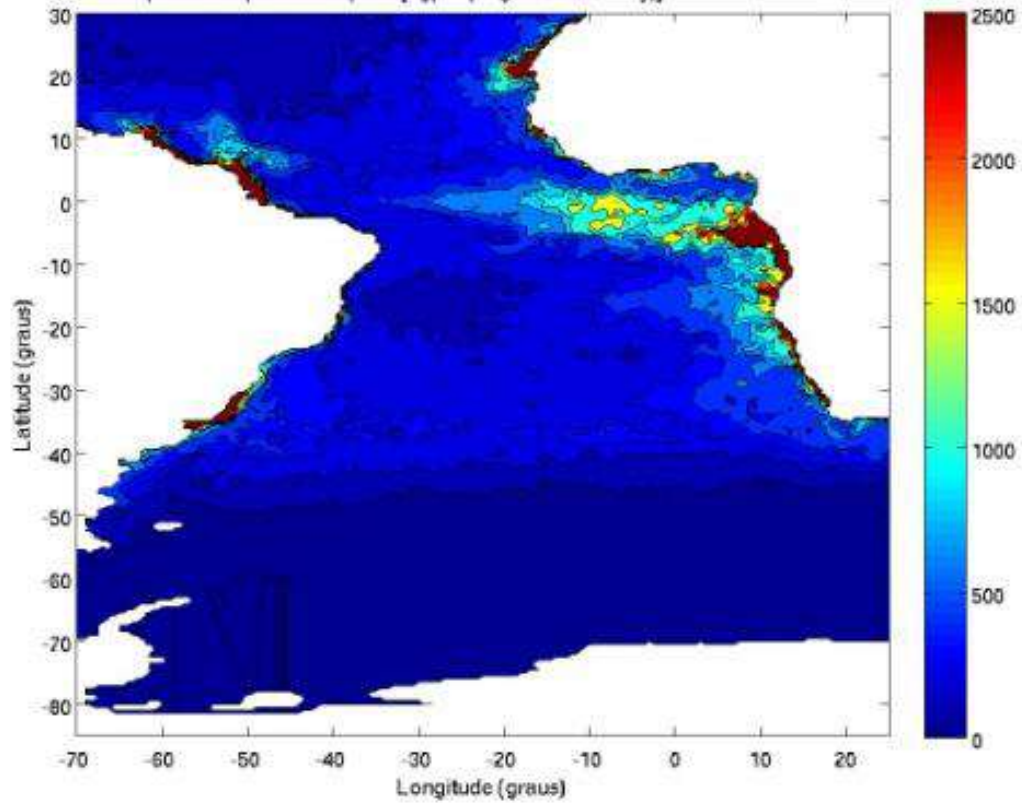
(a)

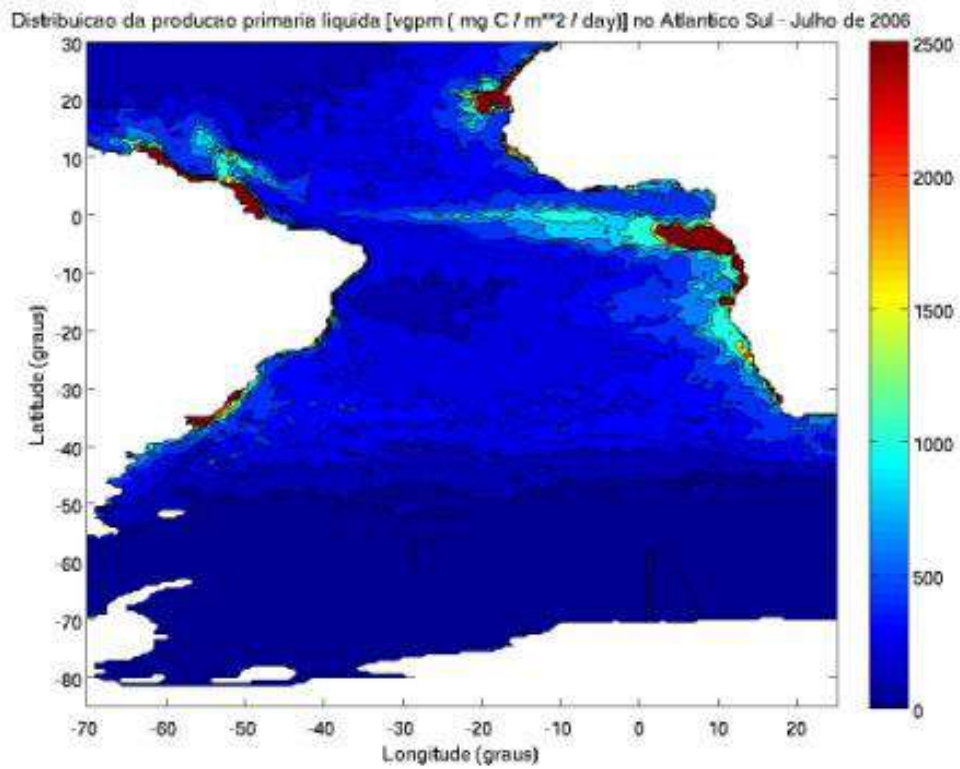




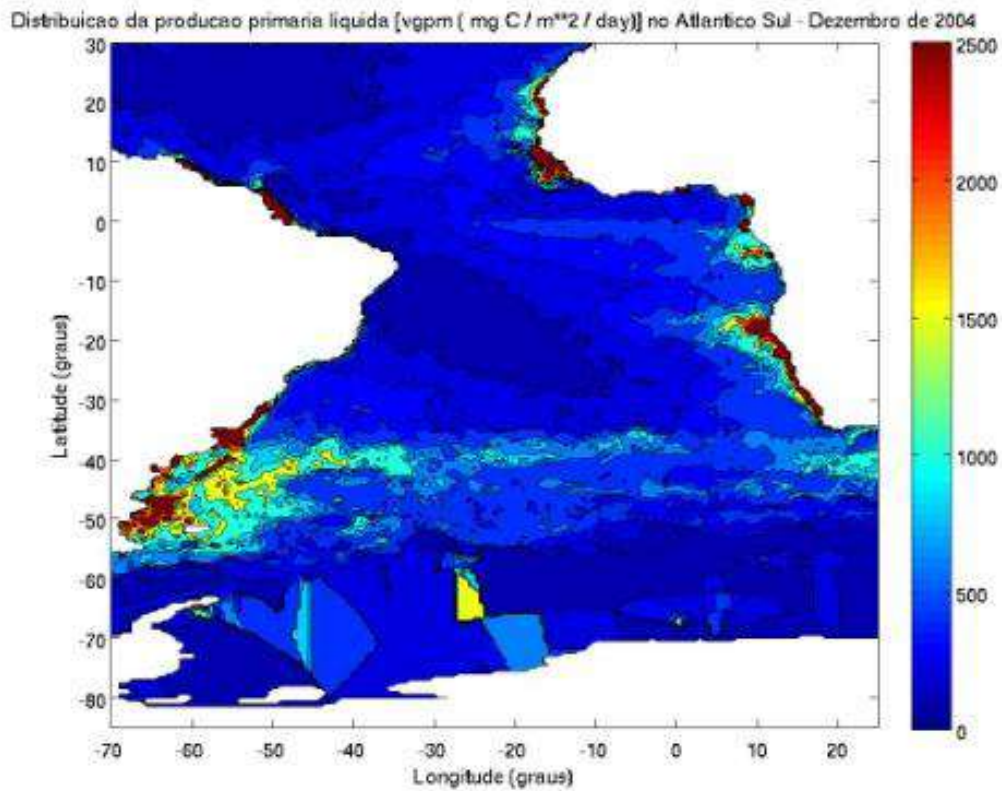
(b)

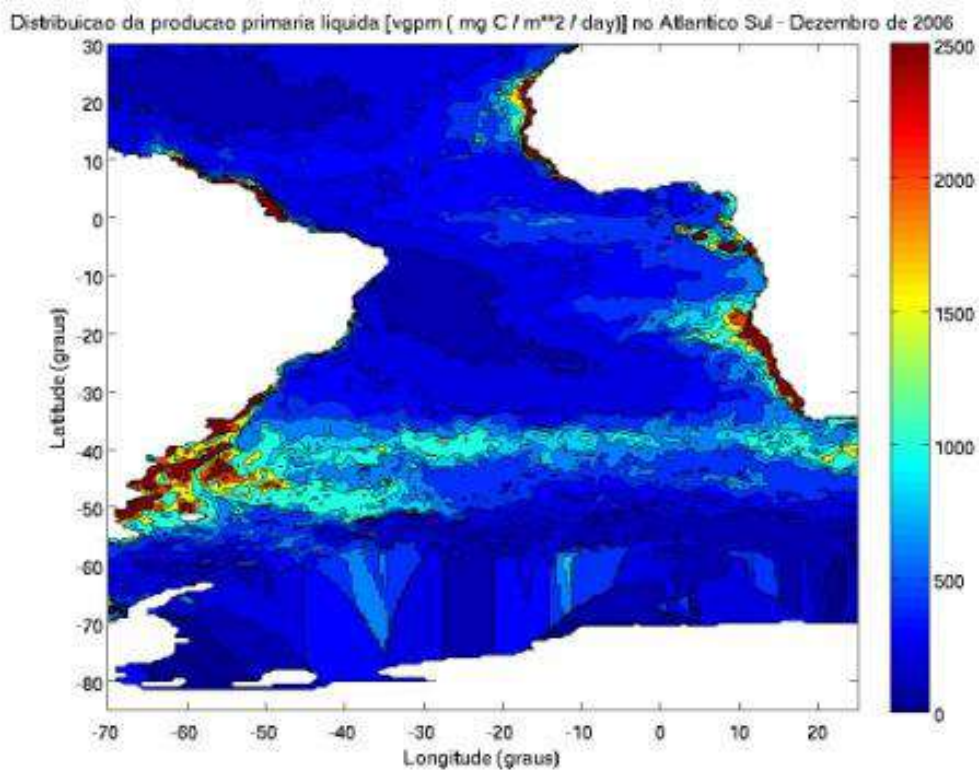
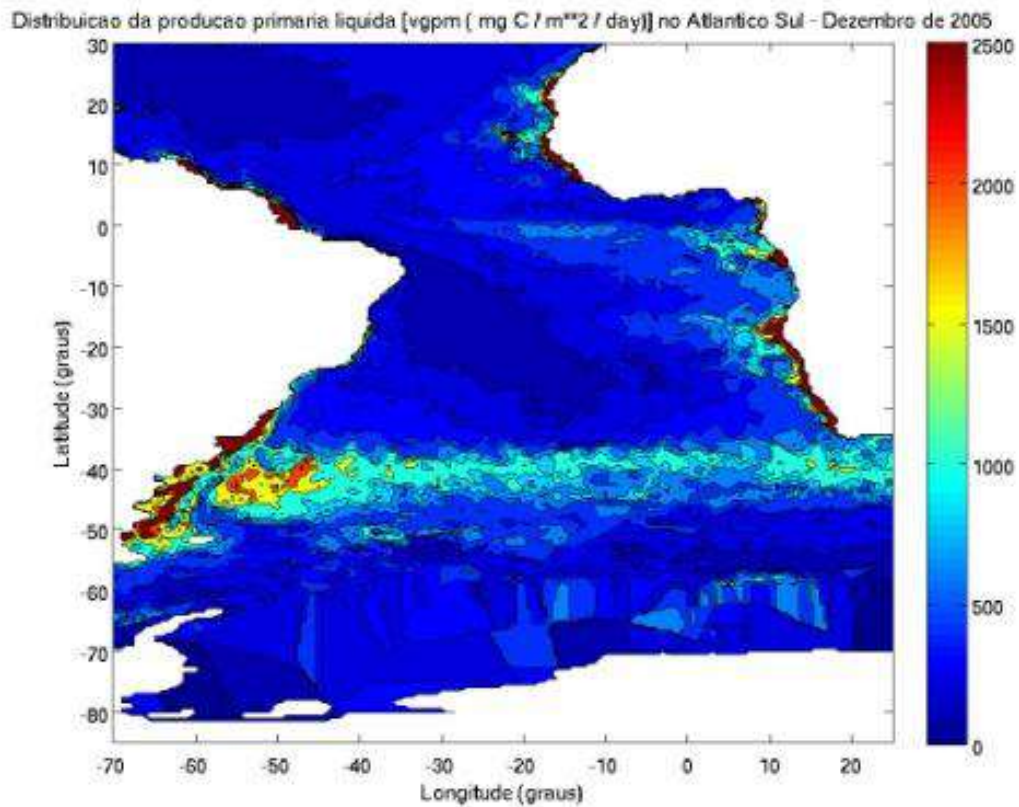
Fig. 5.3 - Distribuições da produção primária calculada por Eppley-VGPM, na superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Distribuição da produção primária líquida [vgpm (mg C / m² / day)] no Atlântico Sul - Julho de 2004Distribuição da produção primária líquida [vgpm (mg C / m² / day)] no Atlântico Sul - Julho de 2005



(a)





(b)

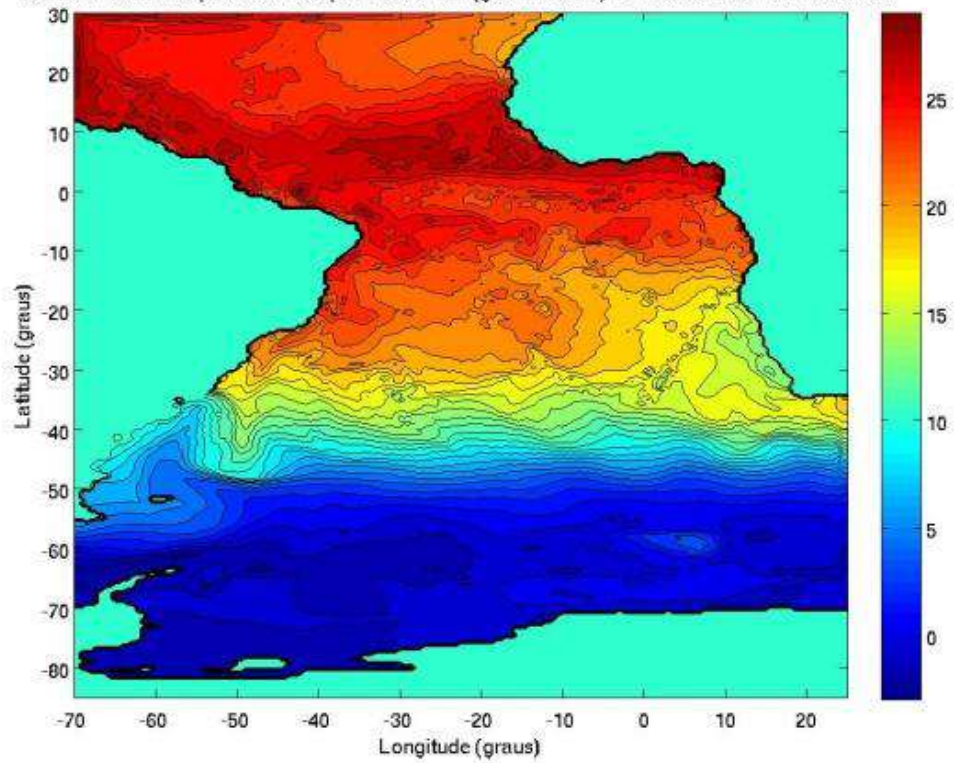
Fig. 5.4 - Distribuições da produção primária calculada por VGPM, na superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em mgC.m⁻².dia⁻¹.

V.3 - Parâmetros meteorológicos e hidrodinâmicos

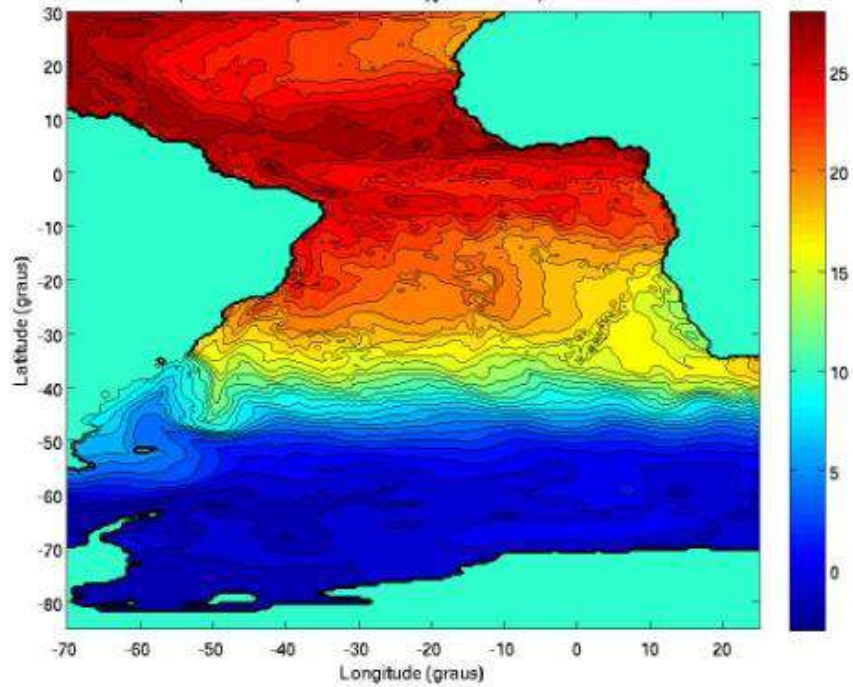
As análises dos parâmetros meteorológicos e hidrodinâmicos também revelaram a ocorrência de um padrão de variabilidade sazonal, como verificado por STRAMMA & SCHOTT (1999) e BAPTISTA (2000) nas análises das correntes, temperatura e salinidade para o Atlântico.

Nas figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 se pode verificar a variação da temperatura do mar, elevação da superfície do mar, pressão atmosférica na superfície e ventos na superfície, para os meses de julho e dezembro de 2004, 2005 e 2006.

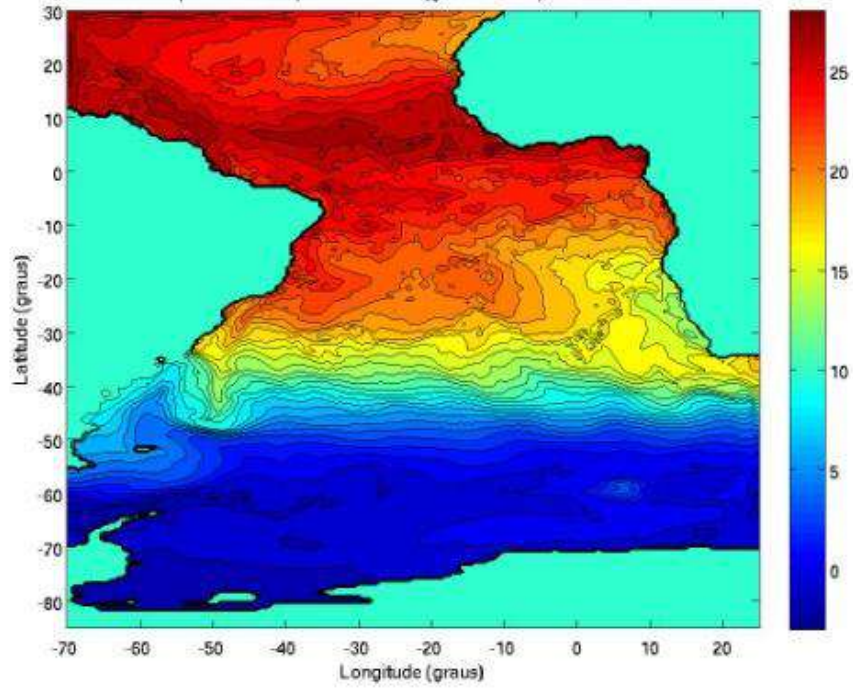
Distribuição da temperatura na superfície do mar (graus Celsius) no Atlântico Sul - Julho de 2004



Distribuição da temperatura na superfície do mar (graus Celsius) no Atlântico Sul - Julho de 2005

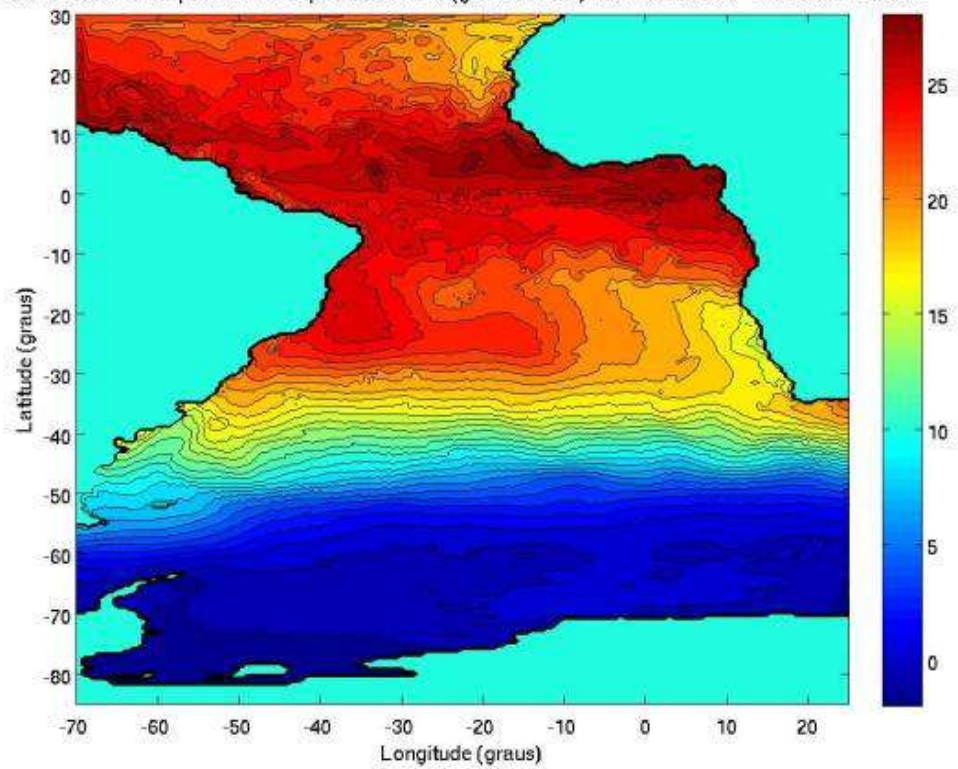


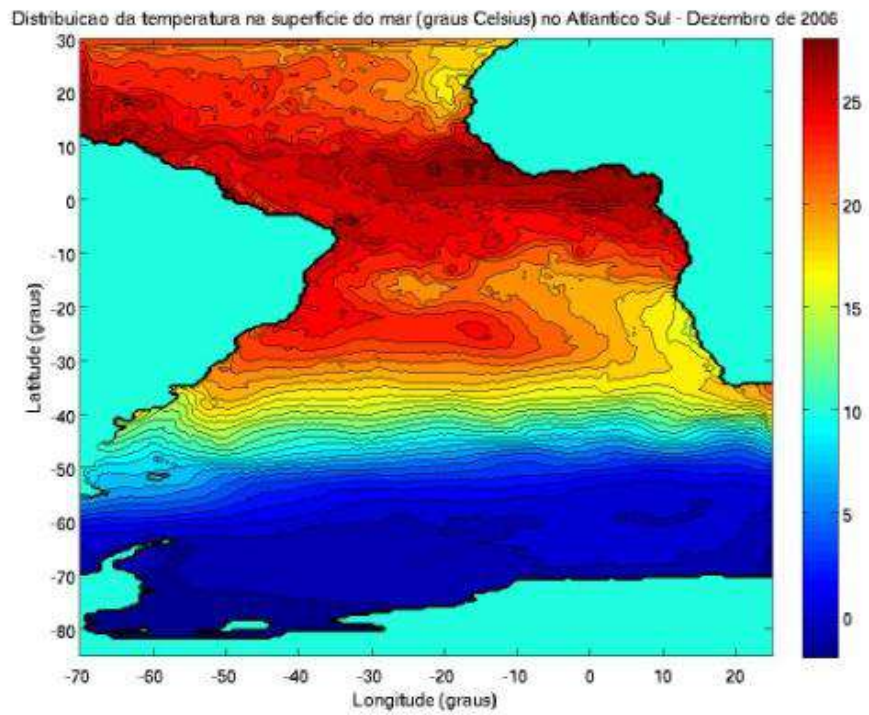
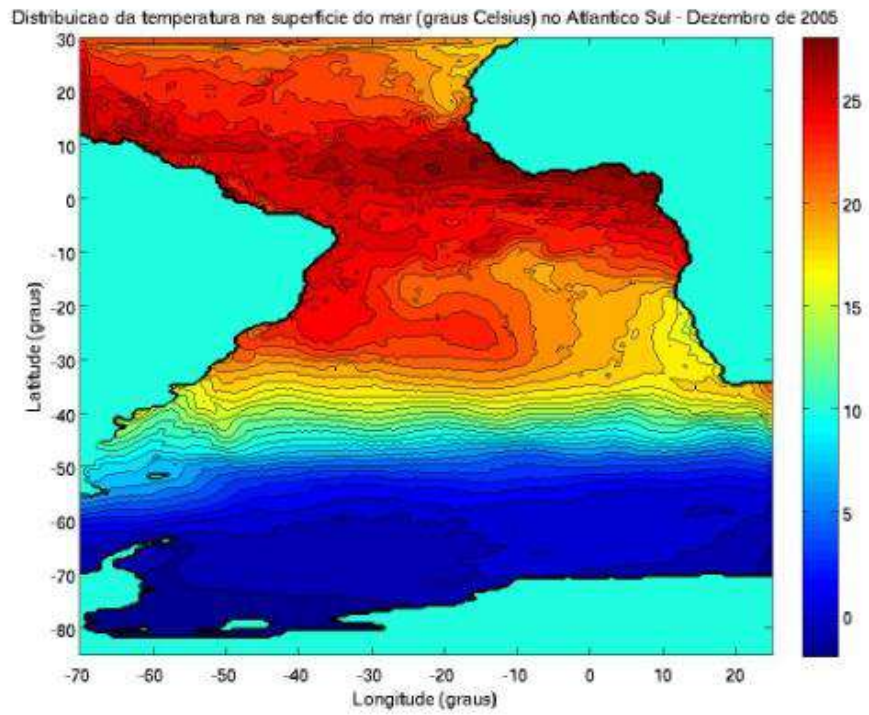
Distribuição da temperatura na superfície do mar (graus Celsius) no Atlântico Sul - Julho de 2006



(a)

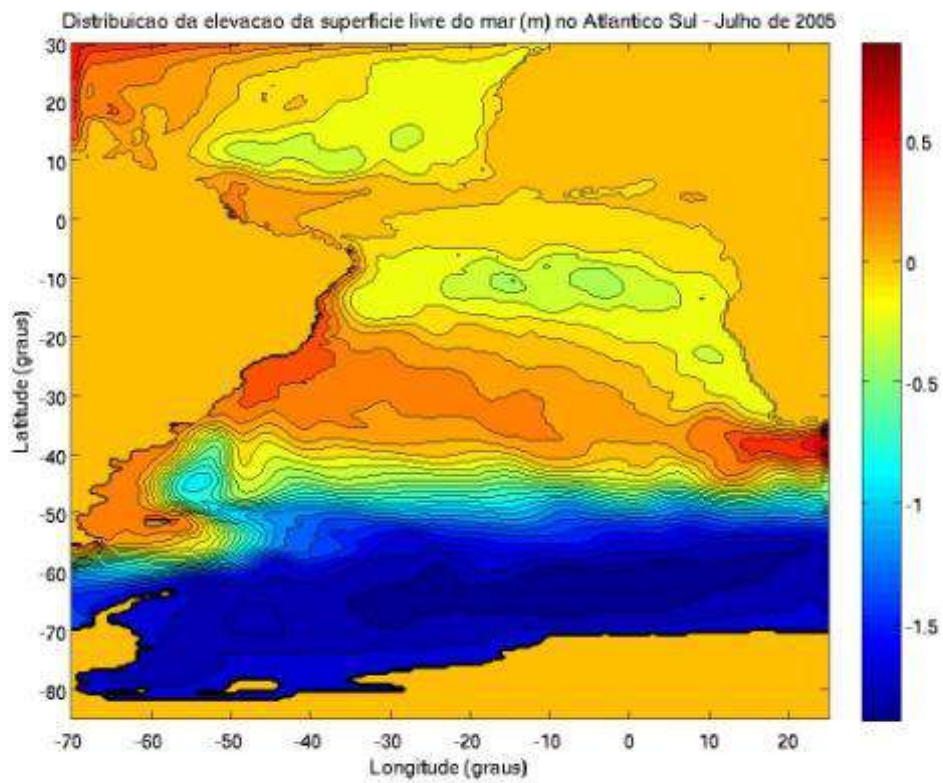
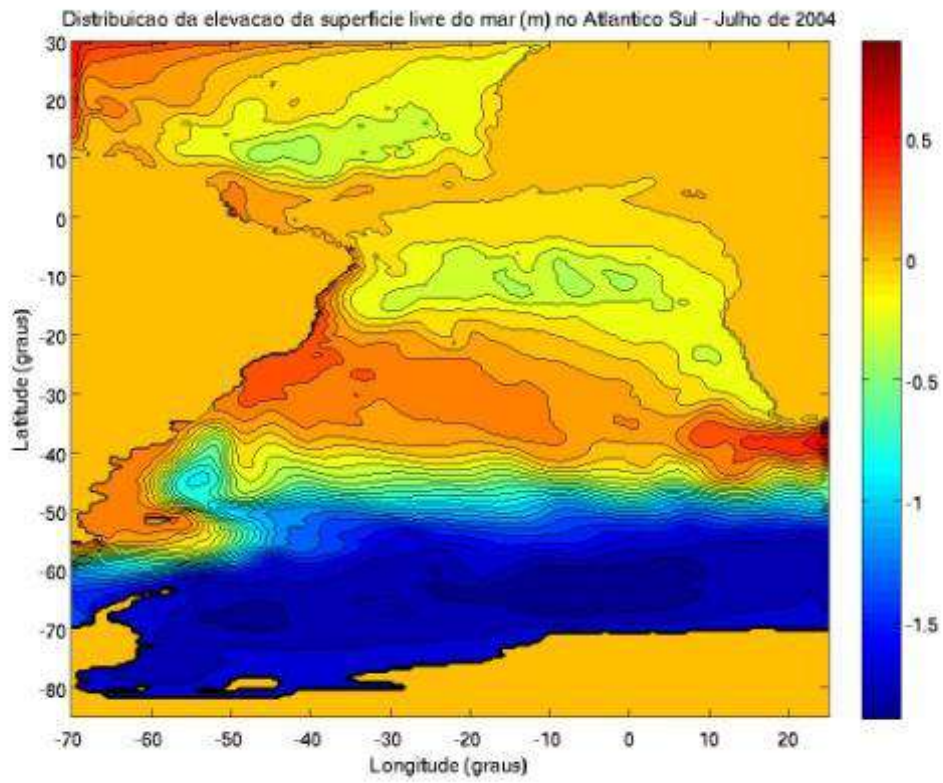
Distribuição da temperatura na superfície do mar (graus Celsius) no Atlântico Sul - Dezembro de 2004

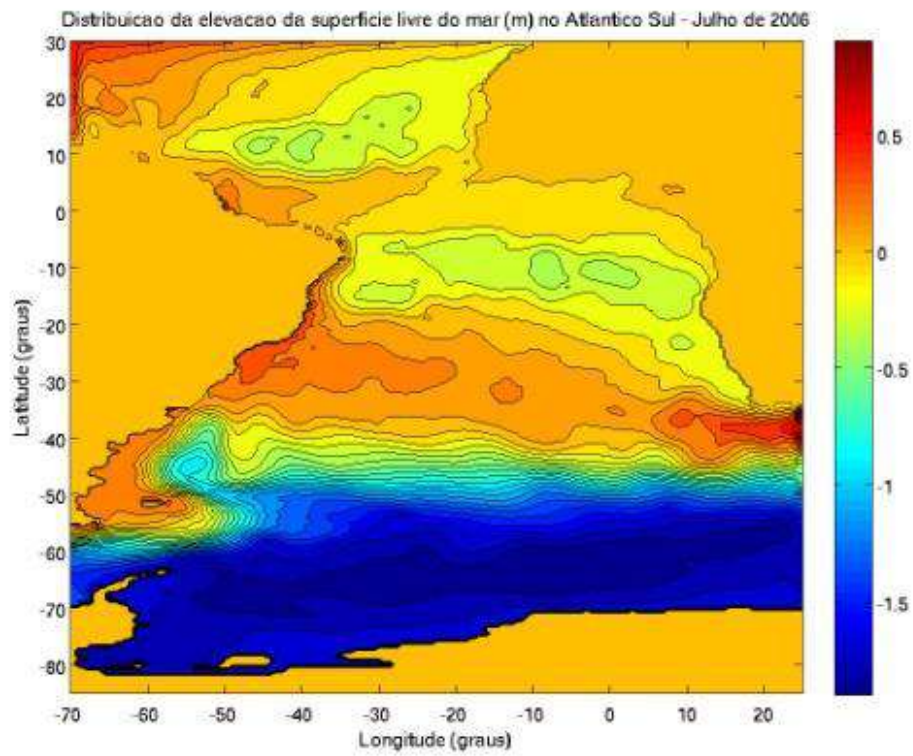




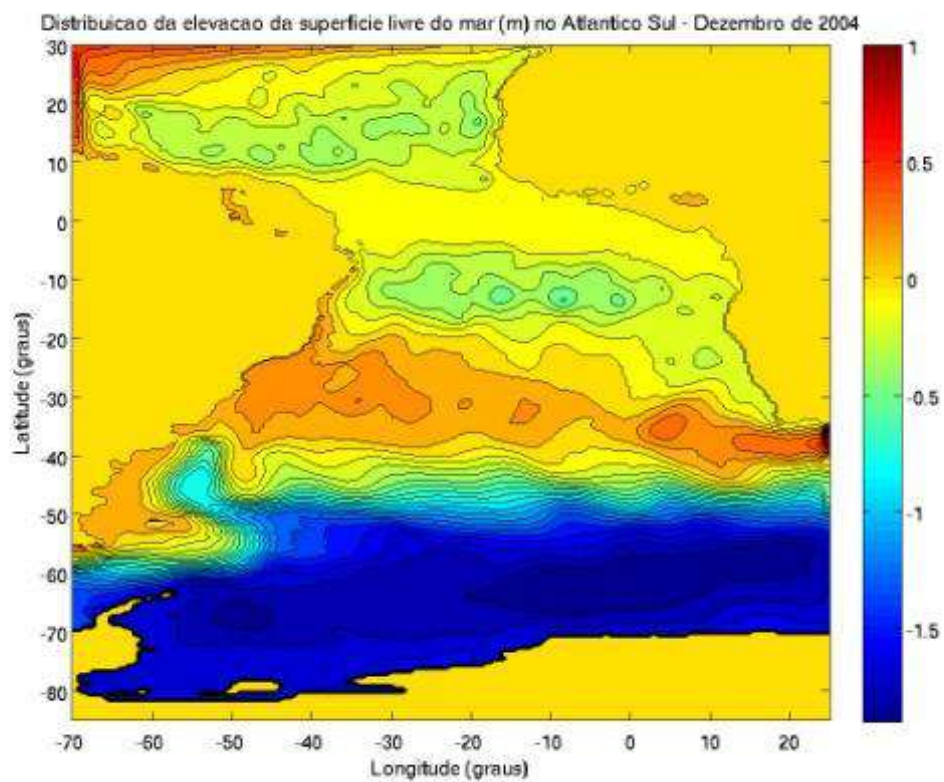
(b)

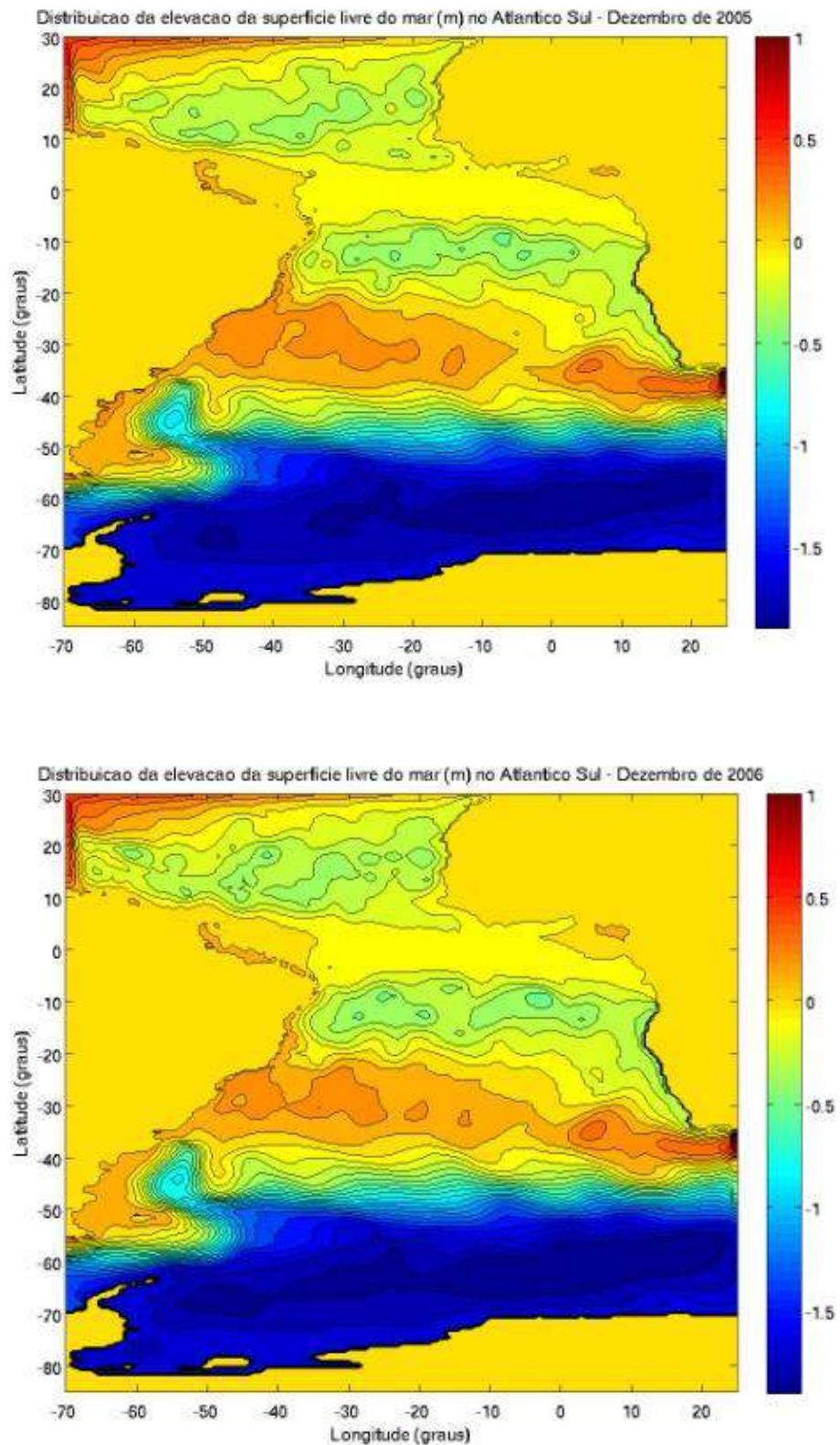
Fig. 5.5 - Distribuições da temperatura na superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em °C.





(a)





(b)

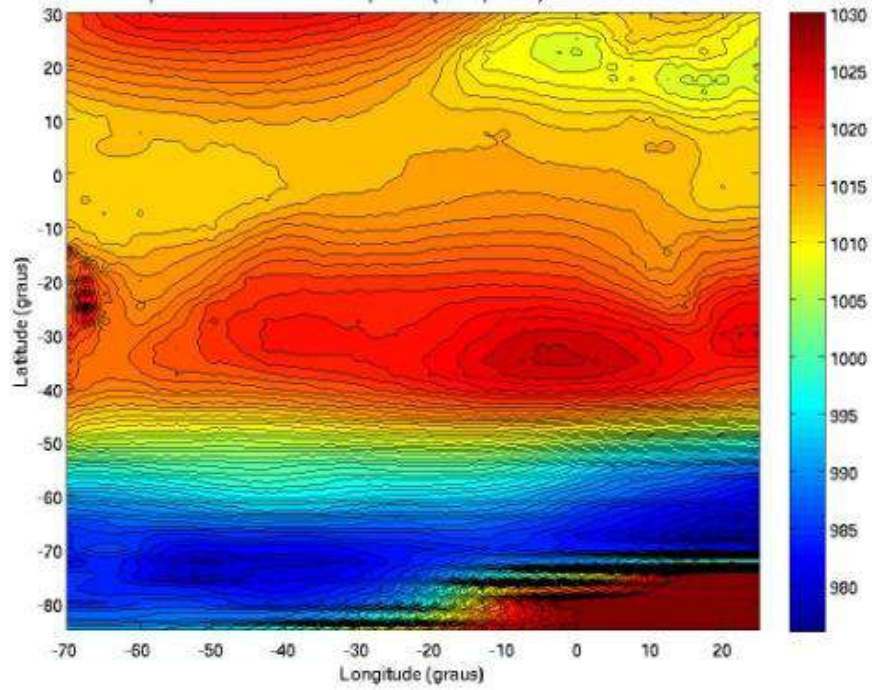
Fig. 5.6 - Distribuições da elevação da superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em m.

Os mapas de temperatura da superfície do mar demonstram o padrão de variação meridional desta propriedade, com máximos no Equador e mínimos nos pólos; as isolinhas são praticamente paralelas aos paralelos terrestres, mas com o deslocamento na direção do equador no lado leste dos oceanos, cujas temperaturas mais baixas são associadas à ressurgência costeira no lado leste dos oceanos, relacionada aos campos de ventos de superfície (Figura 5.5); todo o padrão de isotermas possui deslocamento meridional de acordo com as estações do ano.

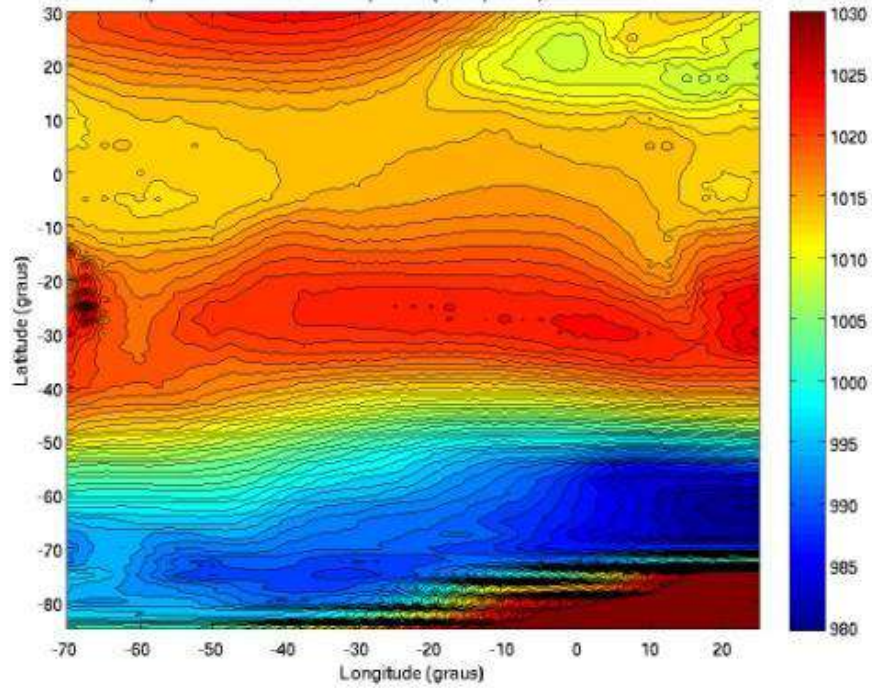
Na figura 5.6, a variação da superfície livre do mar apresenta um padrão sazonal de variabilidade menos evidente, mantendo as regiões de nível do mar mais baixo ao sul de 50° S e maior elevação no sudoeste do Atlântico Sul, definindo o Giro Subtropical do Atlântico Sul; este padrão se desloca de dezembro para julho em direção ao equador.

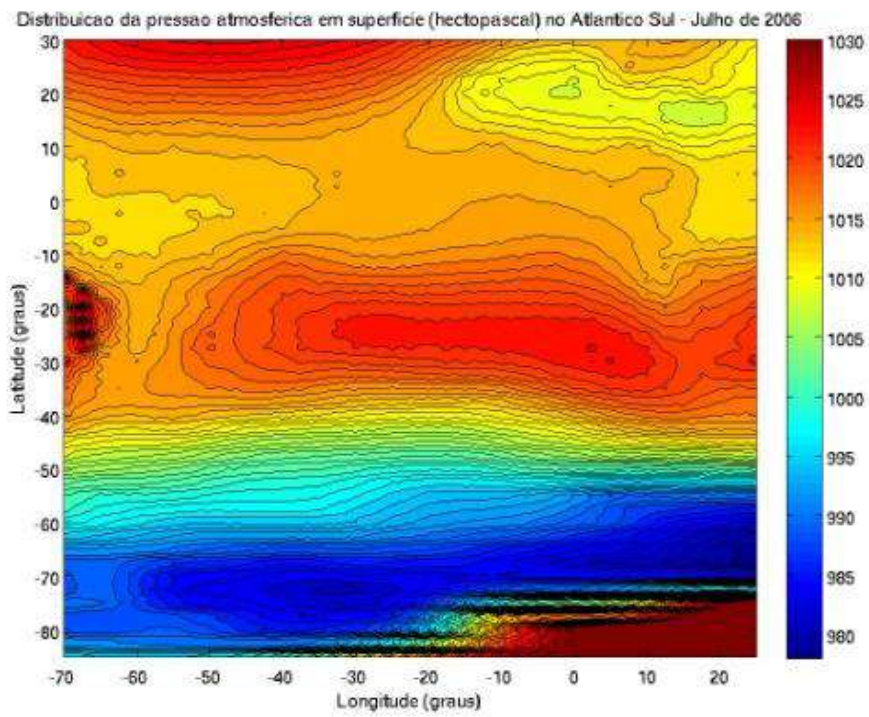
O padrão estabelecido em relação a pressão atmosférica mostra uma intensificação dos núcleos de alta e baixa pressão no inverno em relação ao verão (FIGURA 5.7); esses núcleos apresentam também um grande deslocamento longitudinal no decorrer do ano.

Distribuição da pressão atmosférica em superfície (hectopascal) no Atlântico Sul - Julho de 2004

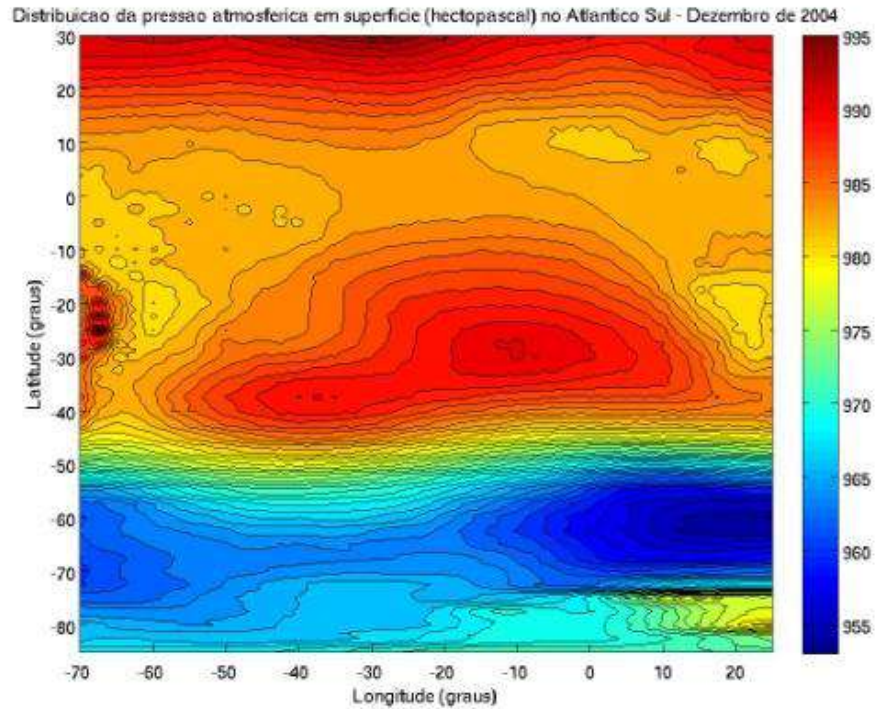


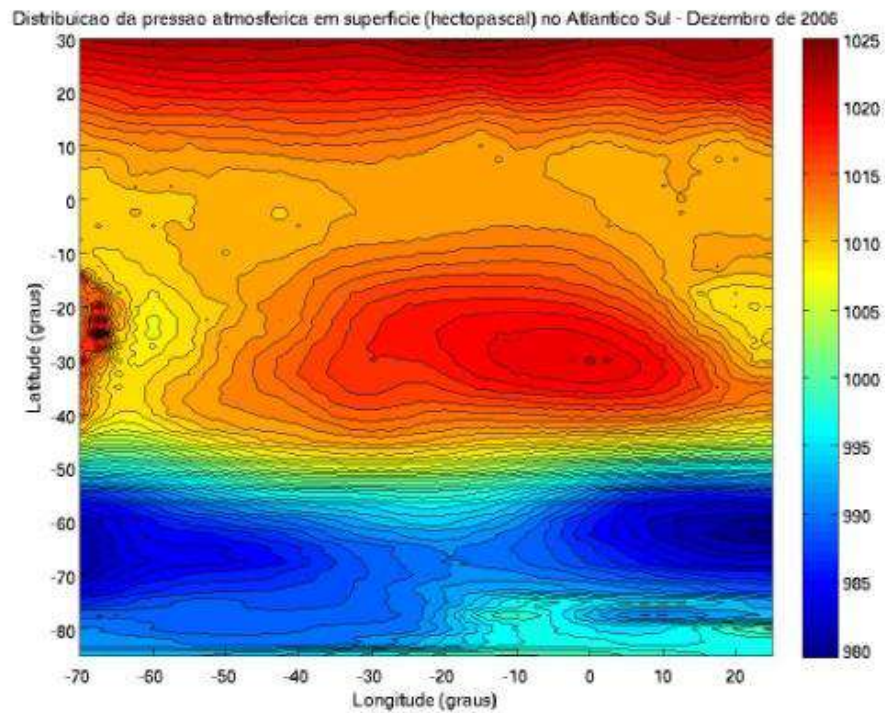
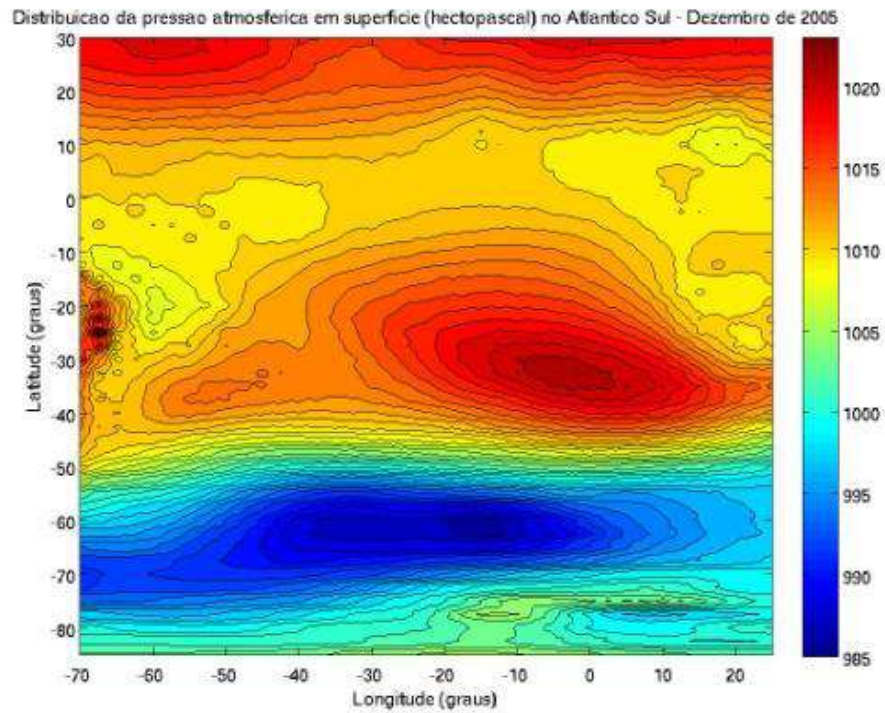
Distribuição da pressão atmosférica em superfície (hectopascal) no Atlântico Sul - Julho de 2005





(a)



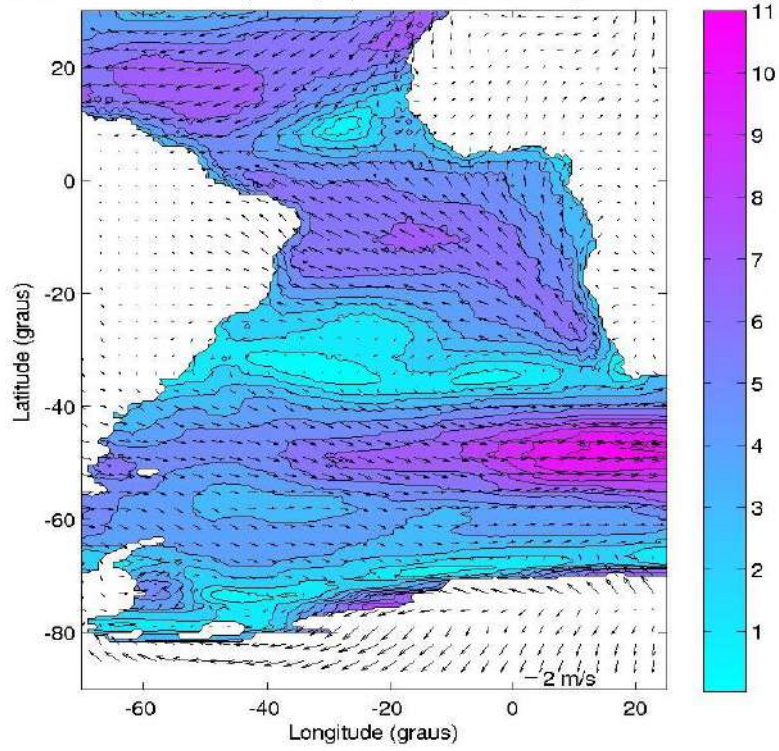


(b)

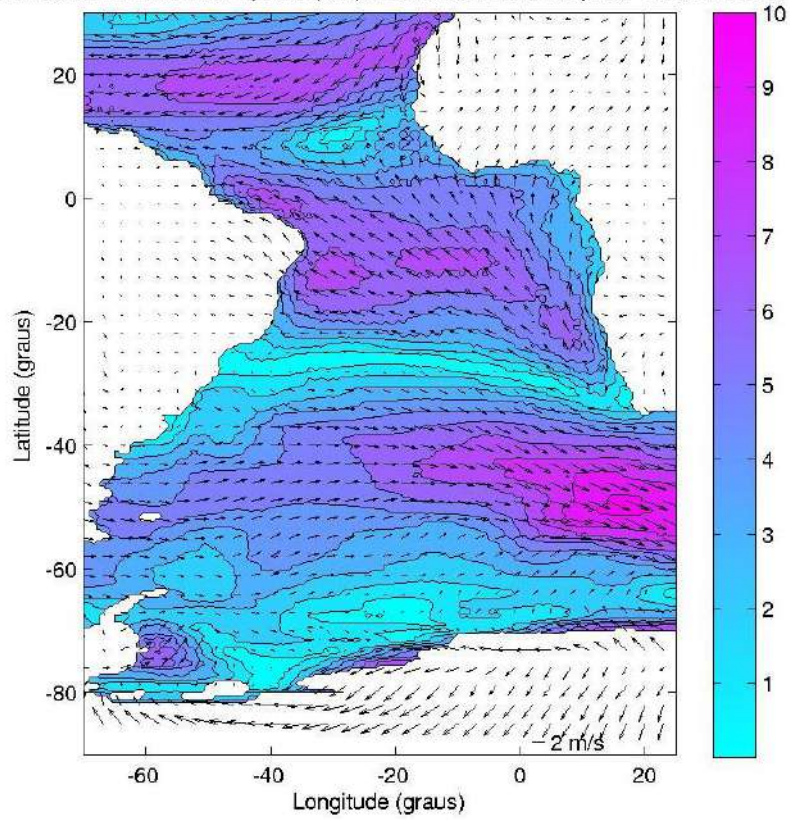
Fig. 5.7 - Distribuições da pressão atmosférica na superfície do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em hPa.

Os mapas de ventos demonstram, para o Atlântico, as posições dos centros de alta pressão subtropicais e os giros dos ventos ao seu redor, bem como os padrões associados à Zona de Convergência Inter-tropical, que definem as distribuições dos ventos nas baixas latitudes. Novamente se deve ressaltar os máximos de ventos zonais em torno de 50°S e os máximos de ventos alíseos nas baixas latitudes (Figura 5.8).

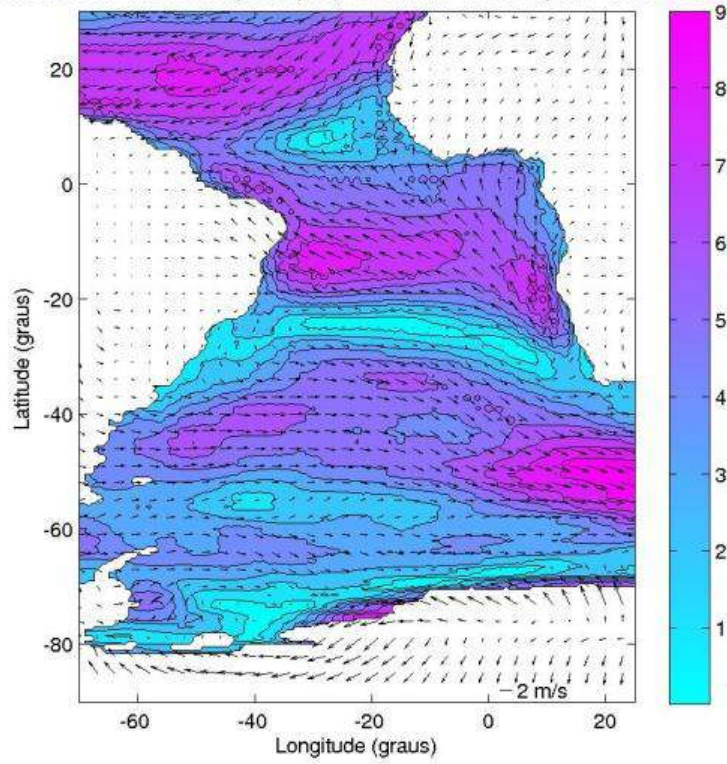
Velocidades do vento em superfié (m/s) no Atlântico Sul e Tropical - Julho de 2004



Velocidades do vento em superfié (m/s) no Atlântico Sul e Tropical - Julho de 2005

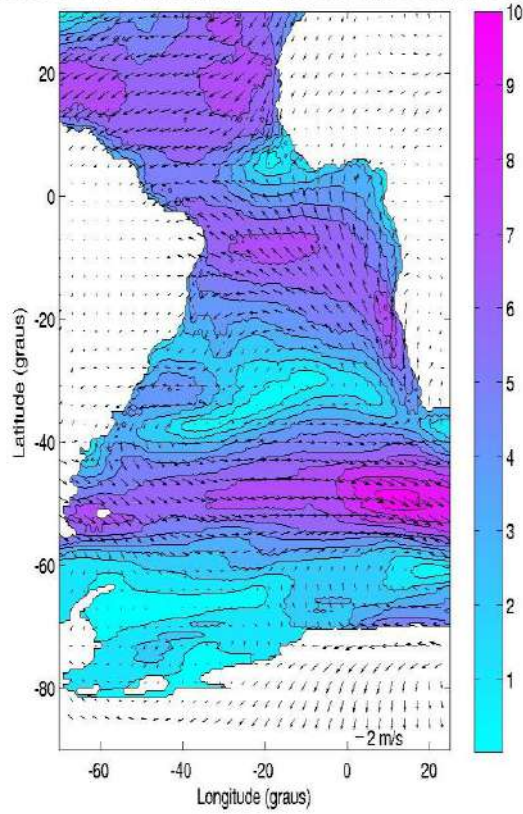


Velocidades do vento em superfie (m/s) no Atlantico Sul e Tropical - Julho de 2006

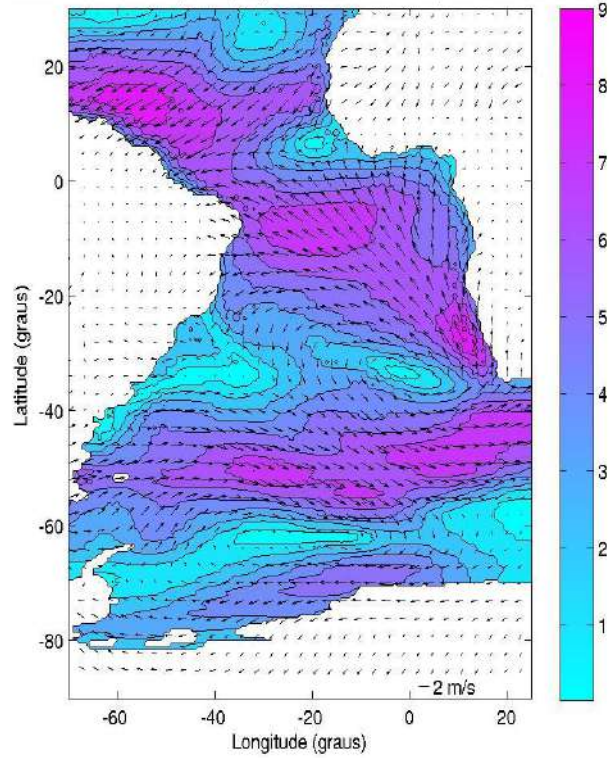


(a)

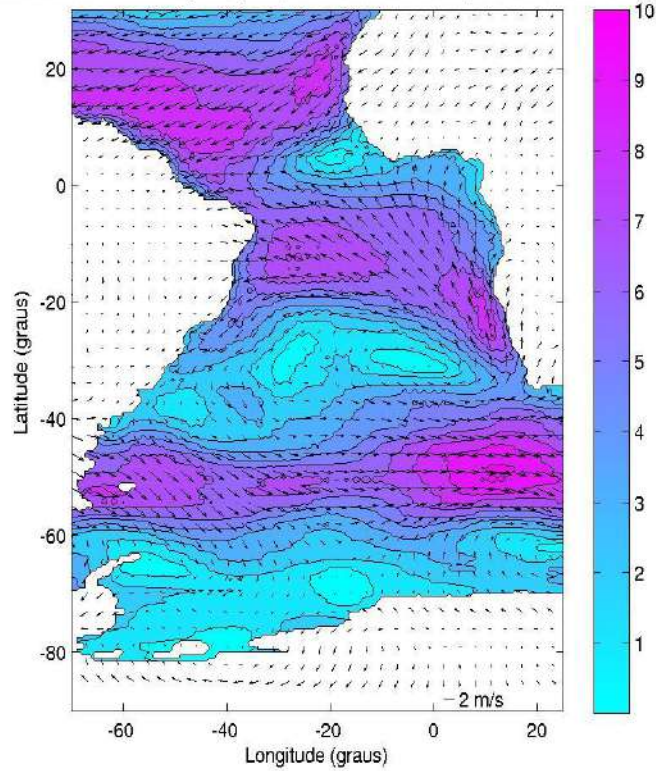
Velocidades do vento em superfie (m/s) no Atlantico Sul e Tropical - Dezembro de 2004



Velocidades do vento em superfie (m/s) no Atlantico Sul e Tropical - Dezembro de 2005



Velocidades do vento em superfie (m/s) no Atlantico Sul e Tropical - Dezembro de 2006



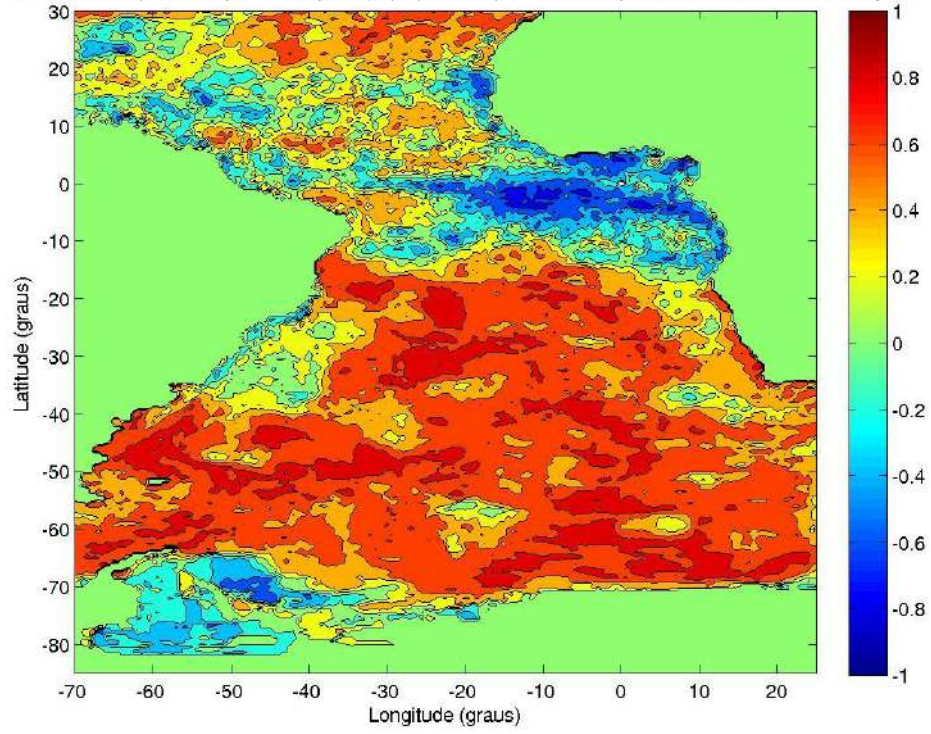
(b)

Fig. 5.8 - Distribuições de ventos na superfície (vetores e intensidade sombreada) do Atlântico Sul e Tropical, no decorrer dos anos de 2004 a 2006, em julho (a) e dezembro (b), em m/s.

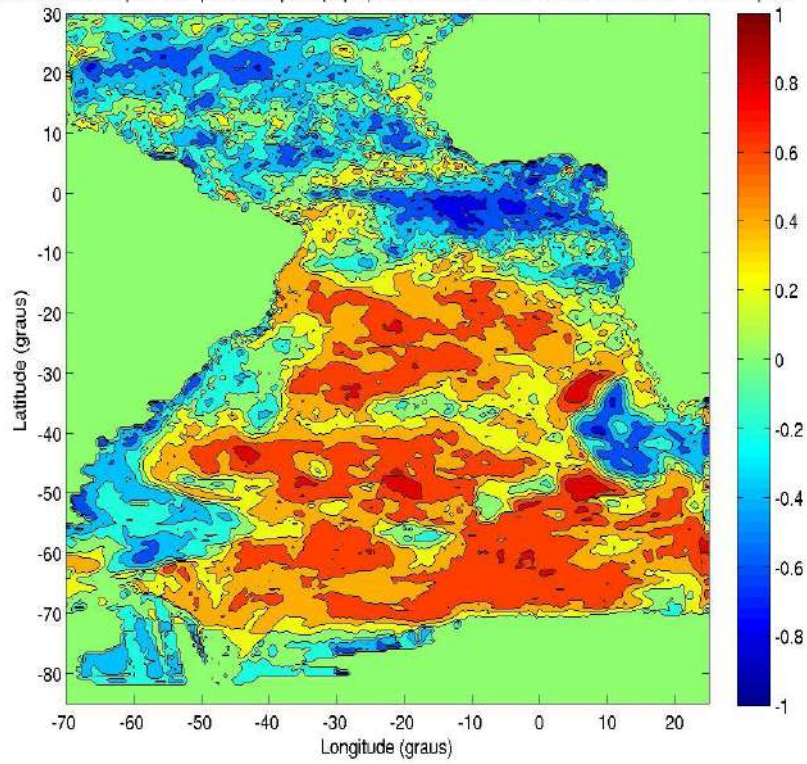
V.4 – Correlações entre parâmetros biológicos e físicos

A figura 5.9 apresenta as correlações entre a produtividade primária calculada pelo modelo CbPM e os parâmetros meteorológicos e oceânicos, a saber: temperatura do mar, elevação da superfície, pressão atmosférica e ventos. As figuras 5.10, 5.11 e 5.12 contêm também correlações entre a clorofila e a produtividade calculada pelos demais modelos, com as mesmas variáveis físicas acima citadas.

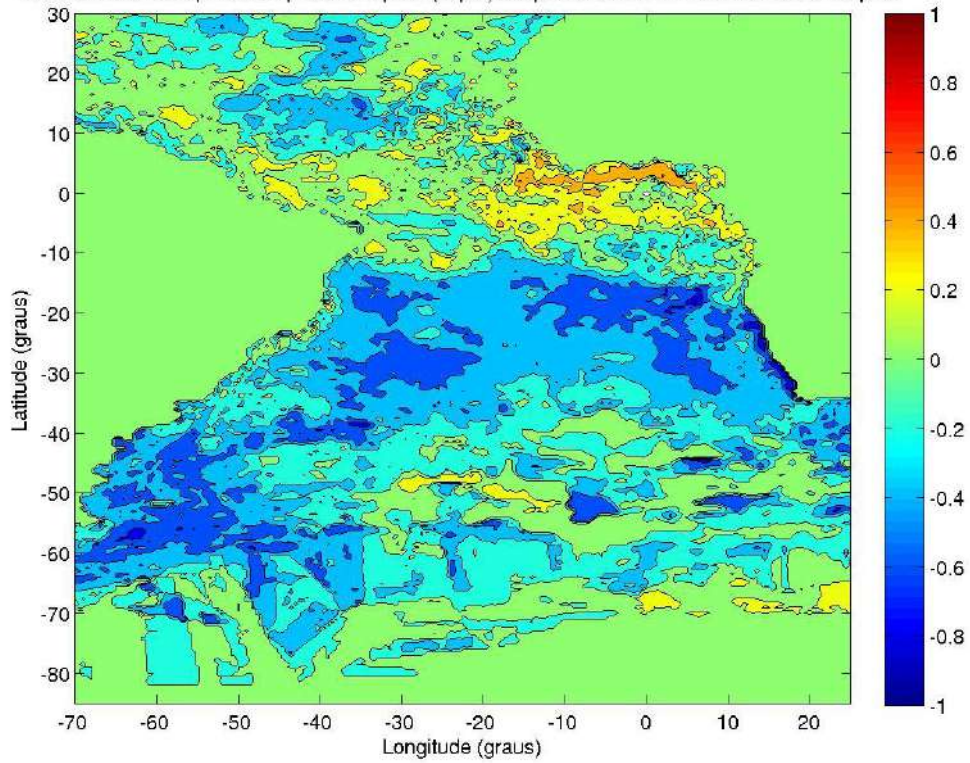
Correlação entre a produção primária líquida (cbpm) e a temperatura de superfície no Atlântico Sul e Tropical



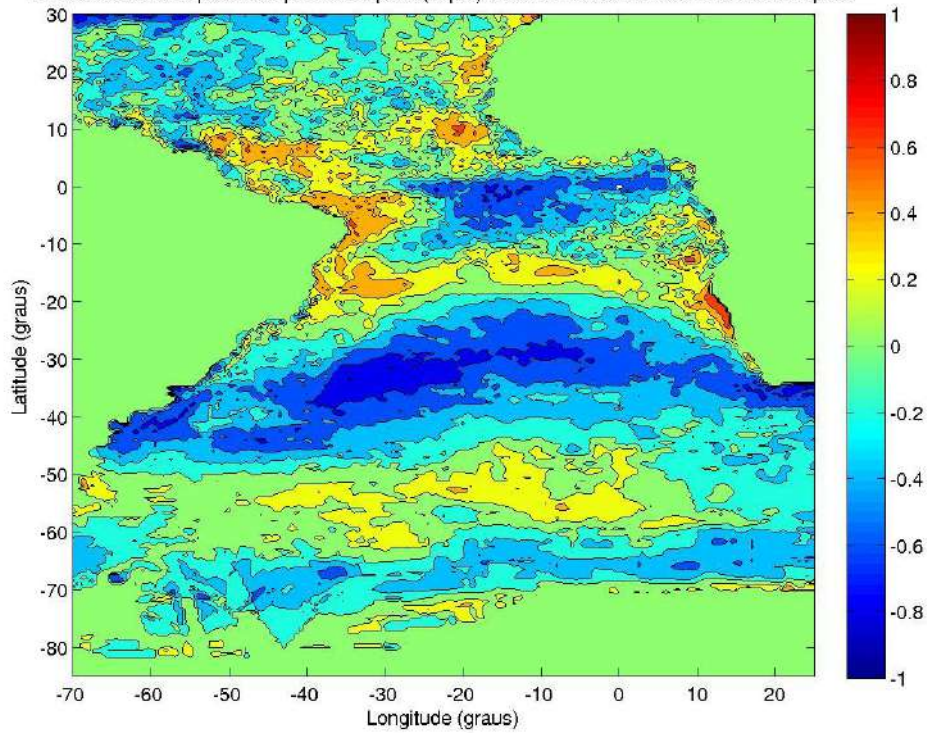
Correlação entre a produção primária líquida (cbpm) e a variação do nível do mar no Atlântico Sul e Tropical



Correlação entre a produção primaria líquida (cbpm) e a pressão do ar no Atlântico Sul e Tropical



Correlação entre a produção primaria líquida (cbpm) e o vento zonal no Atlântico Sul e Tropical



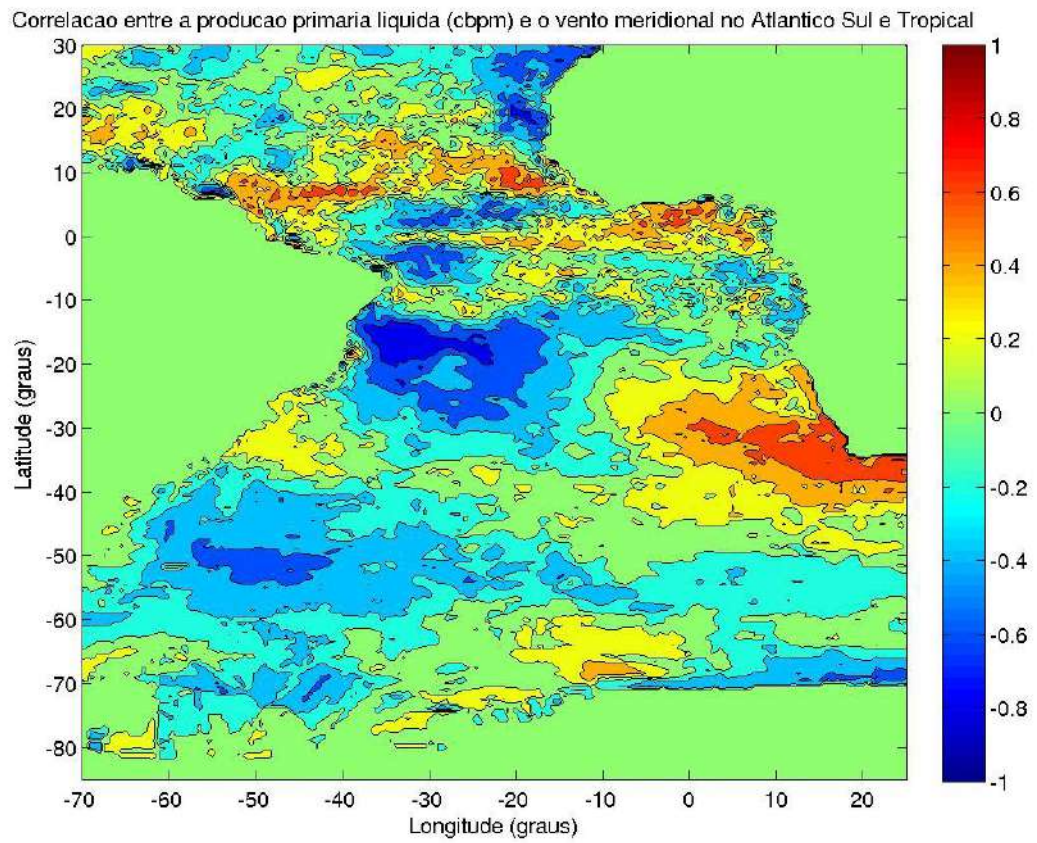
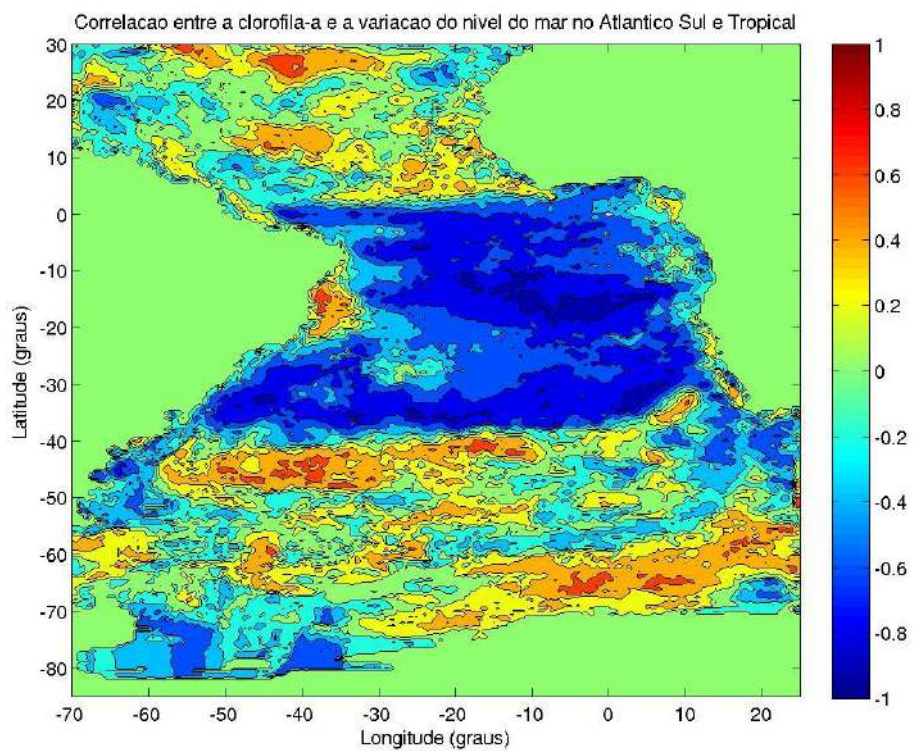
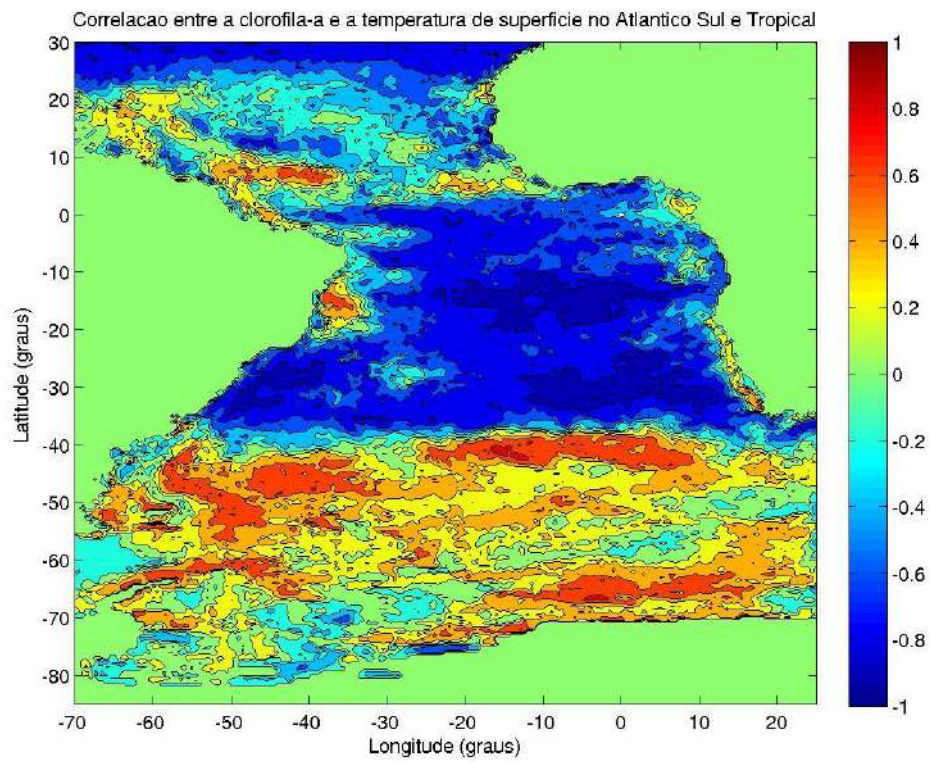
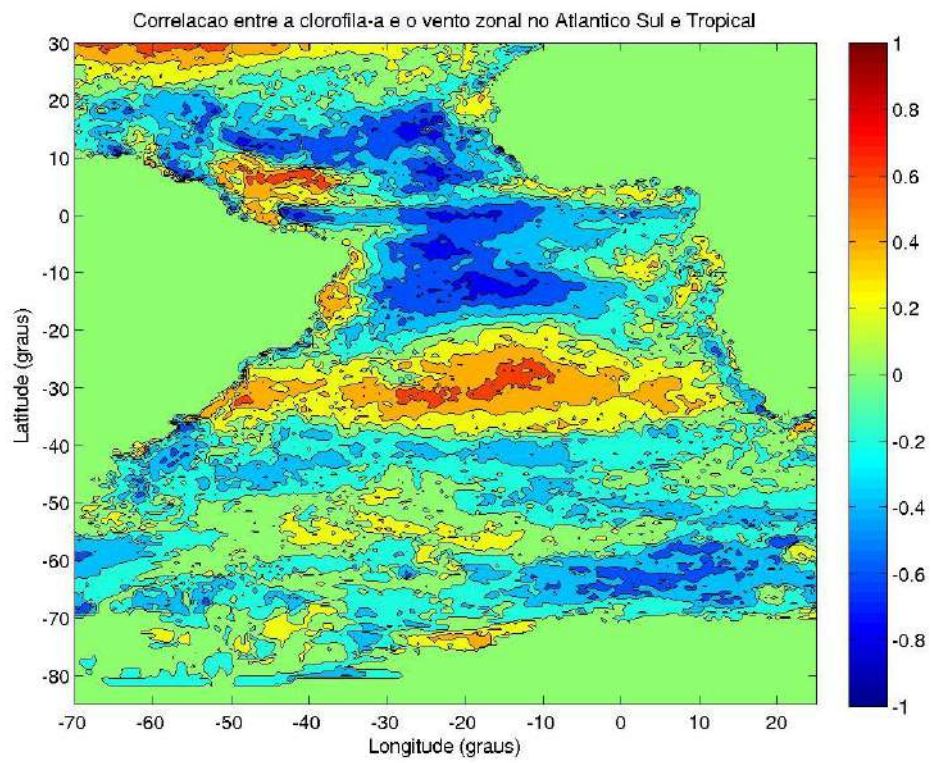
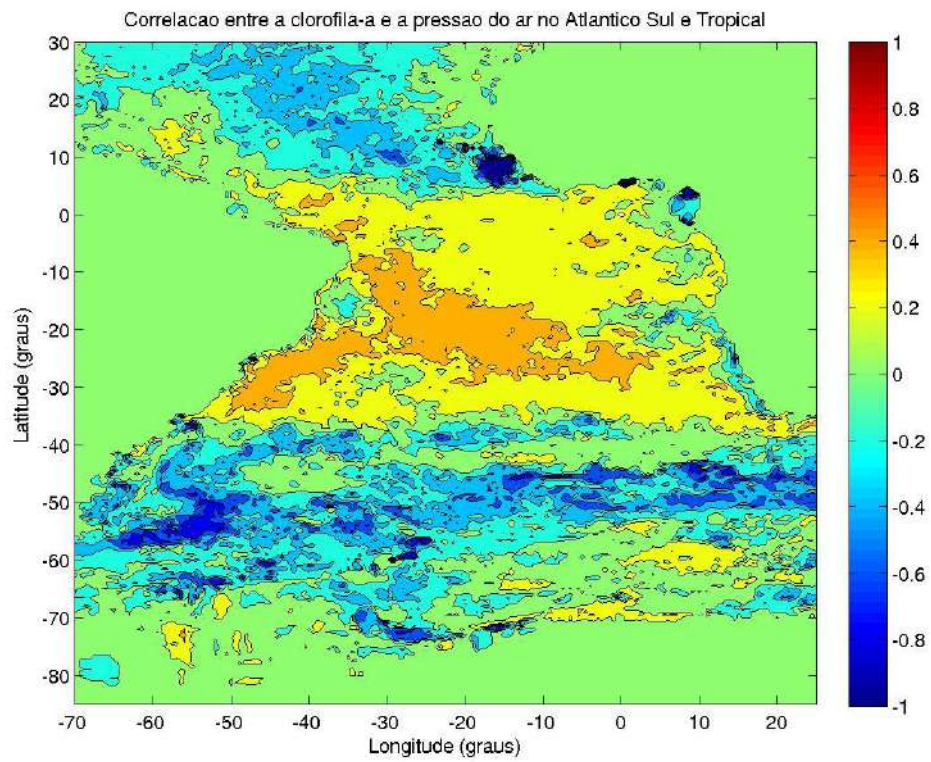


Fig. 5.9 – Correlações da produtividade primária calculada por CbPM e as variáveis de superfície: temperatura do mar, nível do mar, pressão atmosférica e ventos (componentes EW e NS).





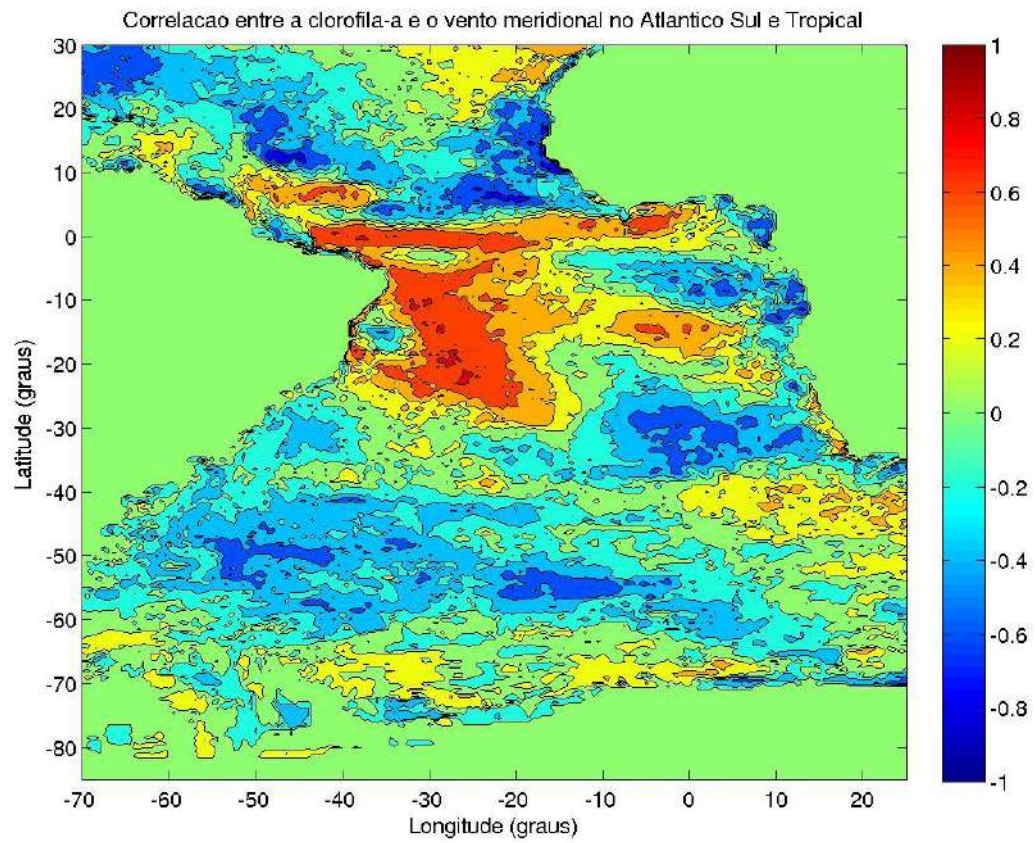
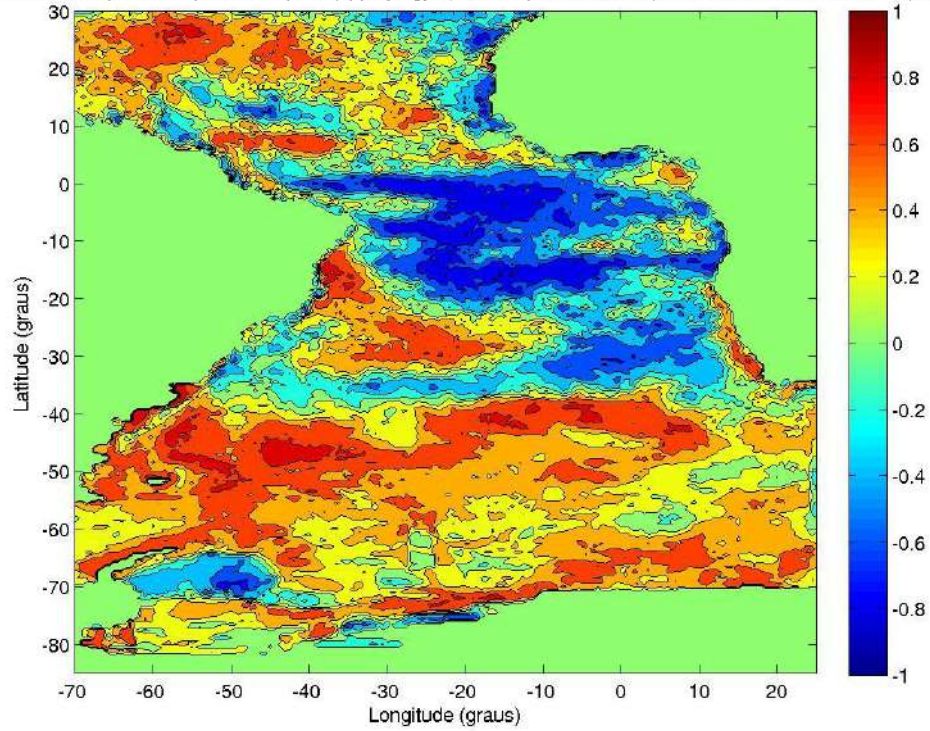
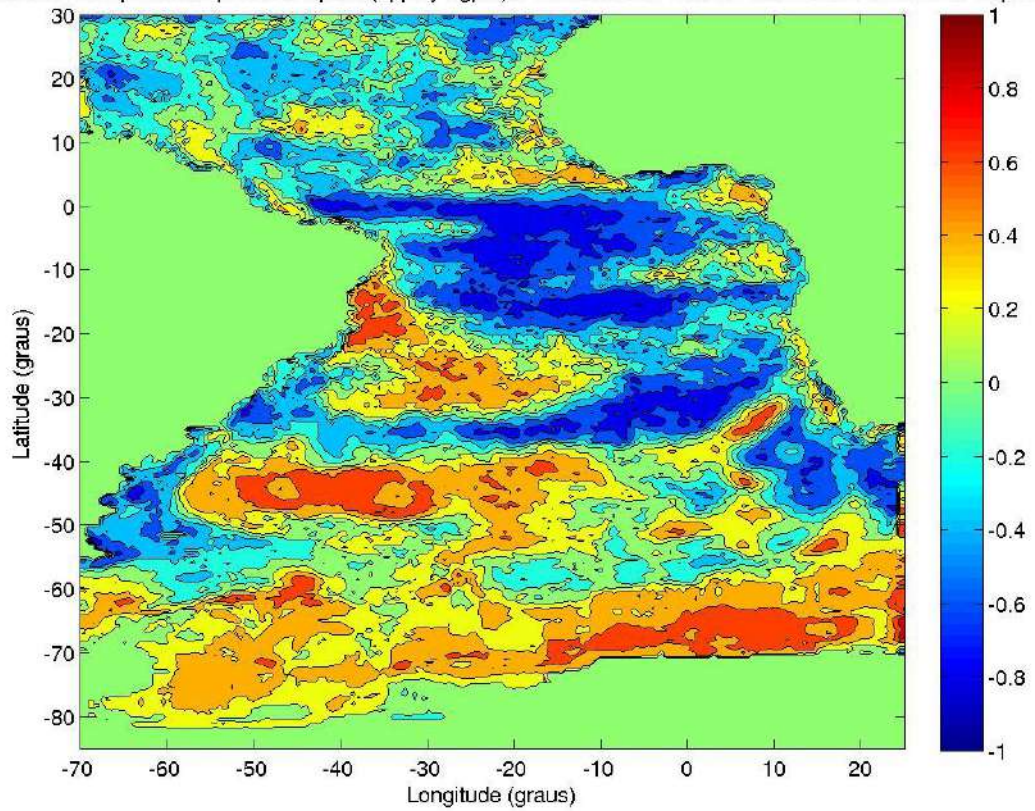


Fig. 5.10 – Correlações da concentração de clorofila e as variáveis de superfície: temperatura do mar, nível do mar, pressão atmosférica e ventos (componentes EW e NS).

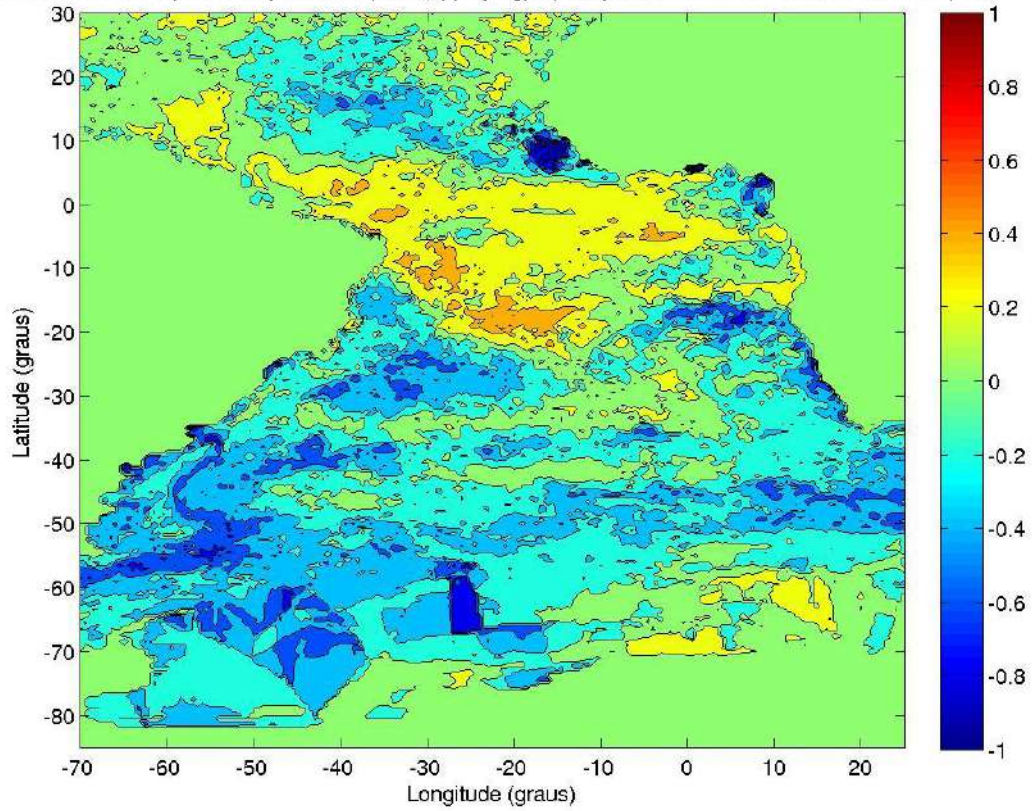
Correlação entre a produção primária líquida (eppley-vgpm) e a temperatura de superfície no Atlântico Sul e Tropical



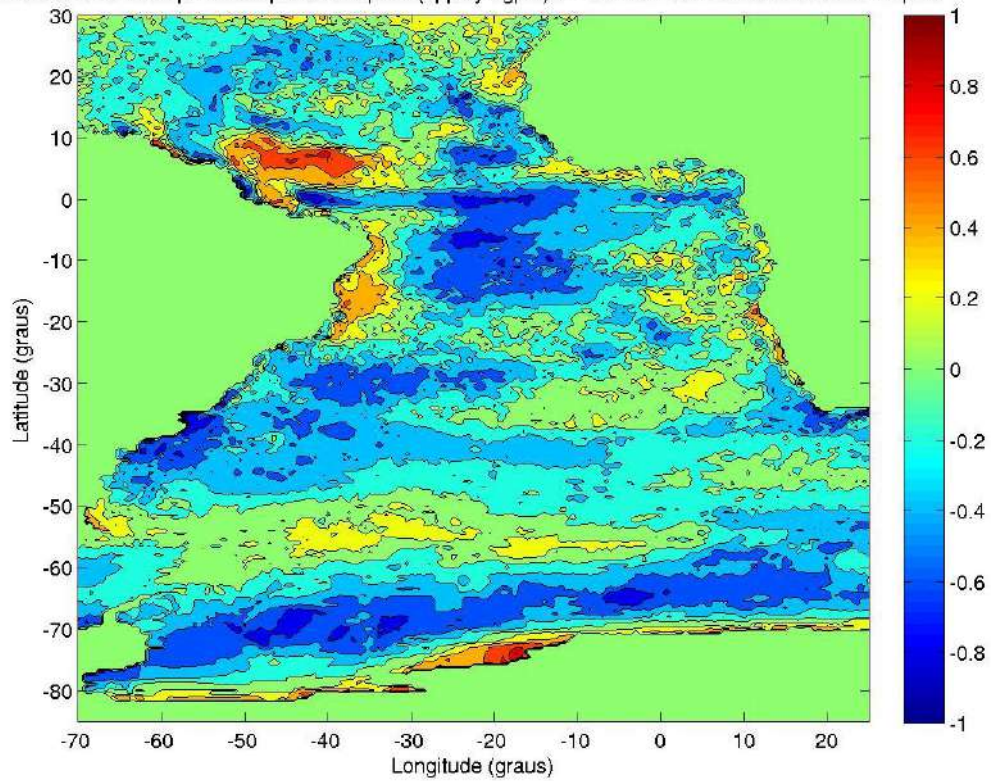
Correlação entre a produção primária líquida (eppley-vgpm) e a variação do nível do mar no Atlântico Sul e Tropical



Correlacao entre a producao primaria liquida (eppley-vgpm) e a pressao do ar no Atlantico Sul e Tropical



Correlacao entre a producao primaria liquida (eppley-vgpm) e o vento zonal no Atlantico Sul e Tropical



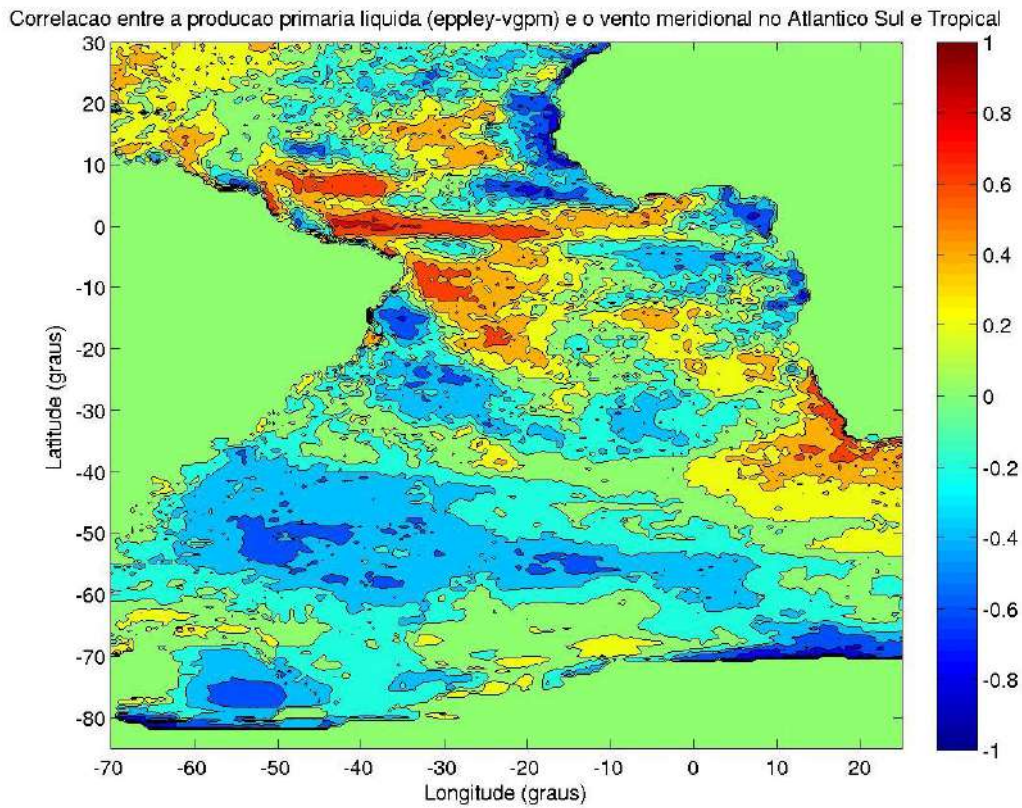
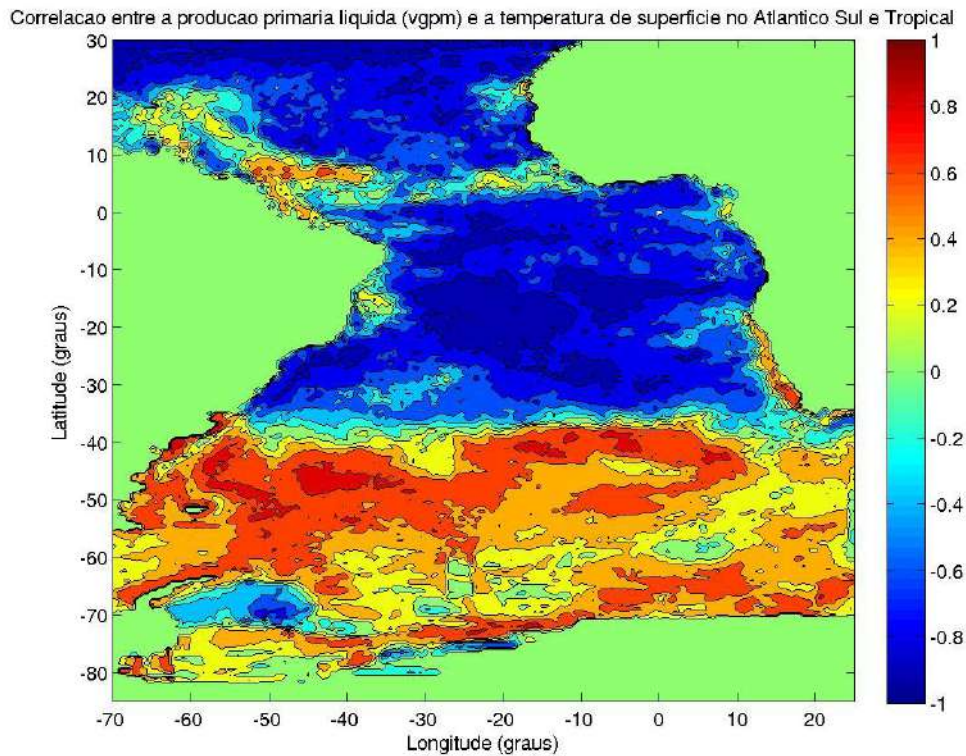
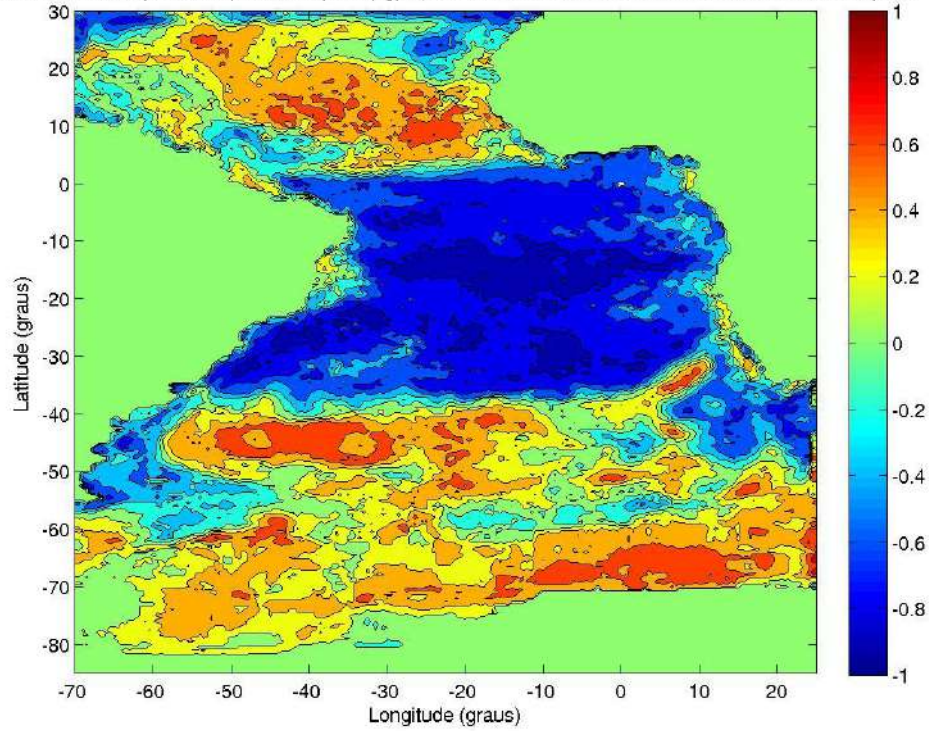


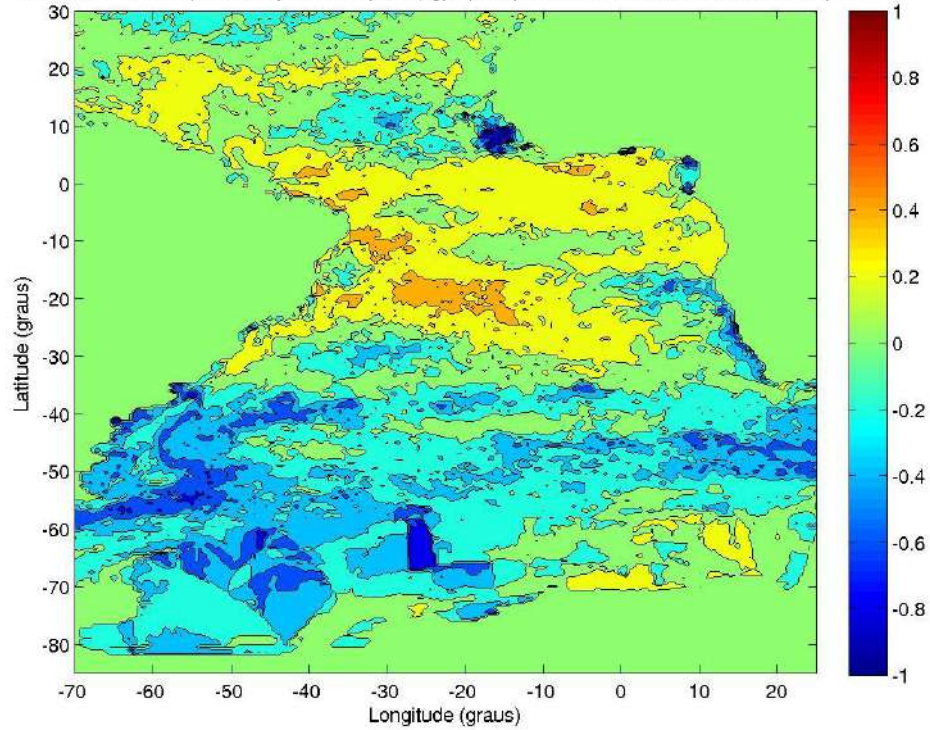
Fig. 5.11 – Correlações da produtividade primária calculada por Eppley – VGPM e as variáveis de superfície: temperatura do mar, nível do mar, pressão atmosférica e ventos (componentes EW e NS).



Correlacao entre a producao primaria liquida (vgpm) e a variacao do nivel do mar no Atlantico Sul e Tropical



Correlacao entre a producao primaria liquida (vgpm) e a pressao do ar no Atlantico Sul e Tropical



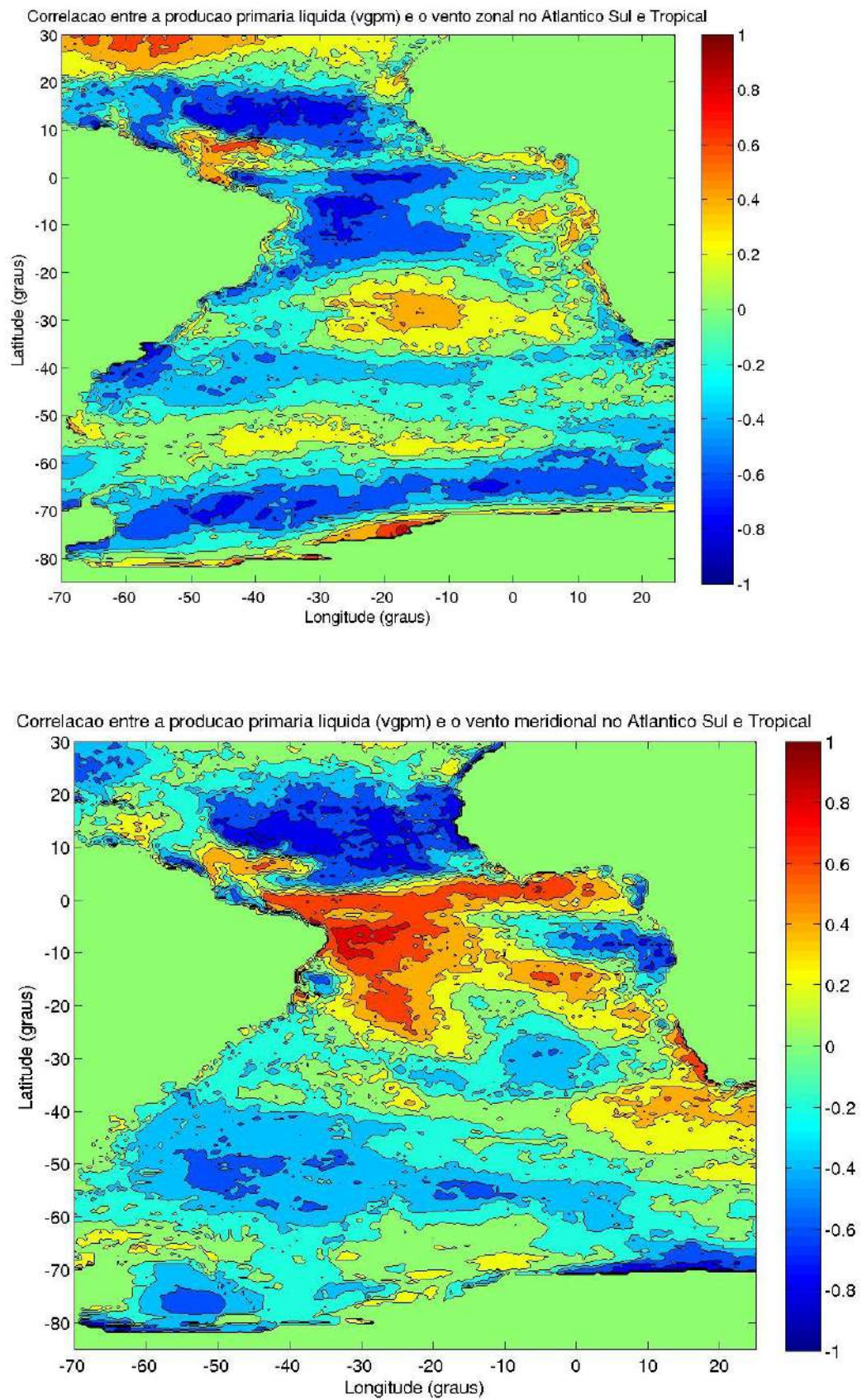


Fig. 5.12 – Correlações da produtividade primária calculada por VGPM e as variáveis de superfície: temperatura do mar, nível do mar, pressão atmosférica e ventos (componentes EW e NS).

As distribuições espaciais das correlações cruzadas entre os parâmetros biológicos e físicos demonstraram uma variação latitudinal significativa. Observa-se também uma diferença no comportamento entre a produtividade primária calculada por CbPM e os demais parâmetros biológicos; de fato, as variações de algoritmos para o cálculo da produção primária resultaram em variações das correlações com os parâmetros meteorológicos e oceanográficos. As distribuições de correlações para clorofila *a* e produtividade primária calculada pelos modelos VGPM e Eppley-VGPM foram muito semelhantes, enquanto que no caso do modelo de produtividade CbPM os resultados têm padrões diferentes, apresentando muitas vezes padrões inversos de correlação.

A análise das correlações calculadas demonstra algumas características importantes, sendo a seguir descritas as referentes à clorofila, quais sejam:

- 1) A temperatura na superfície apresenta correlações positivas elevadas um pouco ao norte do Equador (principalmente no lado oeste) e nas médias e altas latitudes, mas

negativas no Equador e nas baixas latitudes (com exceção da costa brasileira, entre 10 e 15° de latitude Sul).

- 2) O nível do mar também apresenta correlações positivas elevadas ao norte do Equador e nas altas latitudes, e negativas do Equador até 35° S (novamente com exceção da costa brasileira, entre 10 e 15° de latitude Sul).
- 3) A pressão atmosférica não tem correlações muito altas com a concentração de clorofila, apresentando valores moderadamente elevados na região equatorial e nas baixas latitudes do Atlântico Sul.
- 4) A componente do vento zonal (EW) não possui padrões muito definidos nas correlações com os valores de clorofila, apenas uma tendência de alguns valores mais elevados um pouco ao norte do Equador (no lado Oeste) e na faixa de 30° de latitudes Norte e Sul.
- 5) A componente do vento meridional (NS) possui correlações bastante elevadas na região equatorial e no lado oeste das baixas latitudes.

VI- CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se nitidamente que há um padrão sazonal em relação à distribuição de clorofila *a* no Atlântico Sul e Tropical, sendo tal diagnóstico repetido nas distribuições de produtividade primária calculada pelos três tipos de algoritmos. As variáveis físicas também demonstraram forte caráter sazonal.

As distribuições espaciais das correlações cruzadas entre os parâmetros biológicos e físicos demonstraram uma variação latitudinal significativa. Por exemplo, a componente meridional dos ventos possui alta correlação positiva com os parâmetros biológicos próximo ao equador, especialmente no lado Oeste do Atlântico Sul, enquanto a temperatura do mar apresenta altas correlações negativas em baixas latitudes e positivas em altas latitudes.

A diferença no comportamento entre a produtividade primária calculada por CbPM e os demais parâmetros biológicos pode ser explicada em função dos algoritmos utilizados em cada modelo.

As distribuições das correlações para clorofila *a* e produtividade primária calculada por VGPM (FIGURAS 5.10 e 5.12) demonstraram uma semelhança muito grande, pois o algoritmo do VGPM baseia-se na variação linear da produtividade em relação à concentração de clorofila. Por outro lado, as correlações envolvendo a produção primária calculada por Eppley-VGPM (Figura 5.11) apresentaram um comportamento próximo ao da clorofila e VGPM, mas com um aumento na região de correlação negativa, devido ao fato de seu algoritmo base ser semelhante ao VGPM, porém considerando a curva de temperatura em função do crescimento de EPPLEY (1972). Já a produtividade primária calculada por CBPM (FIGURA 5.9) tem um comportamento diferenciado, e a discrepância provavelmente se deve ao fato que esse modelo considera a atenuação da luz na zona eufótica.

Portanto, é necessário salientar a importância do estudo da diferenciação dos algoritmos utilizados para o cálculo de produtividade, de forma a se detectar as causas dessas variações e que modelo seria o mais adequado.

Outro aspecto a considerar em trabalhos futuros se encontra na necessidade de interpretar as correlações e explicar seus padrões.

O ponto mais importante do presente trabalho se encontra na verificação de altas correlações entre os parâmetros biológicos e físicos, o que demonstra que variações ambientais associadas ao aquecimento global, tais como o aumento da temperatura do ar e do mar, poderão ter graves consequências na distribuição de clorofila e na produtividade primária, com importantes reflexos na cadeia alimentar e nas próprias condições ambientais, afetando por exemplo a fixação do carbono no oceano, e novamente a temperatura do planeta.

VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEHRENFELD, M. J., FALKOWSKI, P. G., 1997a. A Consumer's Guide to Phytoplankton Primary Productivity Models, Institute of Marine and Coastal Sciences, Rutgers University. Limnol. Oceanogr., 42(7), 1479-1491.

BEHRENFELD, M. J., FALKOWSKI, P. G., 1997. Photosynthetic Rates Derived from Satellite-based Chlorophyll Concentration, Institute of Marine and Coastal Sciences, Rutgers University. Limnol. Oceanogr., 42(1), 1-20.

BEHRENFELD, M. J. et al, 1996. Confirmation of Iron Limitation of Phytoplankton Photosynthesis in the Equatorial Pacific Ocean, Michael, Nature 383, pp. 508-511 (October, 1996).

BEHRENFELD, M. J., FALKOWSKI, P. G., RANDERSON, J. T. 1998. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components, Science. Vol.281, pp. 237-240, (10 July 1998).

TOMCZAK, MATHIAS; GODFREY STUART. Regional Oceanography: An Introduction. Cap. 14-15-16. 1ª Edição. 2001.

CLARK, D.K; SHERMAN, J.W. Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: ocean color applications. MTS Journal, v.20, n.2, p.43-56.

DAUBECHIES, P.J., 1988. **Orthonormal Bases on Compactly Supported Wavelets.** **Comm. Pure Applied Mathematics**, 41: 909-996.

FALKOWSKI, P. G., BARBER, R. T., SMETACEK, V. 1998. **Biogeochemical Controls and Feedback on Ocean Primary Production.** *Science*, Vol. 281, pp. 200-206, (10 July 1998).

KALNAY, M. KANAMITSU, AND W.E. BAKER, 1990: **Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center.** **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 71, 1410-1428.

KAMPEL, MILTON, 2003. **“Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através do sensoriamento remoto da cor do oceano e dados *in situ* na costa sudeste brasileira”.** Tese de Doutorado, USP, Instituto Oceanográfico, São Paulo.

MEYER, Y., 1993. **Wavelets: Algorithms and Applications.** Philadelphia, SIAM.

MORETTIN, P.A., 1999. **Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier a Análise de Ondaletas.** Editora Universidade de São Paulo. São Paulo. 272pp.

SIGNORINI, S. R.; HOOKER, S. B.; MCCLAIN, C. R. 2003. **Bio-optical and geochemical properties of the South Atlantic Subtropical gyre.** NASA / TM – 21253, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 43 p.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep-Sea Research II** 46: p. 279-303, 1999.

EPPLEY, R. W. Temperature and phytoplankton growth in the sea. **Fish. Bull.**, Volume 70 (4): p. 1063-1085, 1972.

FALKOWSKI, P. G.; BEHRENFELD, M. J. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. **Limnol. Oceanogr.**, Volume 42(2): p. 1479-1491, 1997.

HARARI, J.; CAMARGO, R.; FRANÇA, C. A. S. Simulations and predictions of the tidal and general circulations in the South and Tropical Atlantic: high resolution grids in the Brazilian shelves. Afro-America Gloss News, **Revista do Global Sea Level Observing System (GLOSS)**, patrocinada pela Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI), <http://www.mares.io.usp.br/aagn/ind.html>, Volume 9 (1): p. 7, 2005.

KAMPEL, M. et al. **Estimativa por satélite da concentração de clorofila a superficial na costa sudeste brasileira, região oeste do Atlântico Sul: Comparação dos algoritmos SeaWiFS**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE. p. 3633-3641, 2005.

PEREIRA, NAIR EMMANUELA DA SILVEIRA. **Análise das correlações entre meteorologia, hidrodinâmica e produção primária no Atlântico Sul e Tropical, através de modelagem numérica e sensoriamento remoto**. Monografia de Graduação, USP, Instituto Oceanográfico, São Paulo. 2009.

PORTAL DA NASA. SITES: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> and <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>.

[IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability](#). Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1000 pp.