



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8984-PUD/62

CAPÍTULO 6
SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À OCEANOGRAFIA

Milton Kampel

INPE
São José dos Campos
2002

CAPÍTULO 6

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À OCEANOGRAFIA

Milton Kampel*

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DIVISÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO

ÍNDICE

DSR/INPE

6-2

M.Kampel

LISTA DE FIGURAS	6.5
1 APRESENTAÇÃO	6.7
2 INTRODUÇÃO	6.9
2.1 O QUE É OCEANOGRAFIA	6.9
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO E OCEANOGRAFIA	6.9
2.3 POTENCIALIDADES DA TECNOLOGIA ESPACIAL NA OBSERVAÇÃO DOS OCEANOS	6.11
3 APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO EM OCEANOGRAFIA	6.15
3.1 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR	6.15
3.1.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS	6.16
3.1.2 RESSURGÊNCIAS	6.18
3.1.3 VÓRTICES E FRENTES	6.19
3.2 COR D'ÁGUA	6.20
3.2.1 CONCENTRAÇÕES SUPERFICIAIS DE CLOROFILA	6.22
3.2.2 PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA	6.24
3.2.3 GERENCIAMENTO COSTEIRO	6.25
3.3 BÓIAS RASTREADAS POR SATÉLITES	6.27
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	6.28
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6.30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Anomalia de temperatura da superfície do mar, entre 18 e 24 de junho de 2002, nos Oceanos Atlântico (parte superior) e Pacífico (parte inferior). A escala de temperaturas encontram-se a direita, em cima17

Figura 2 – Carta-imagem da temperatura da superfície do mar, produzida a partir de imagens do satélite NOAA-12, às 05:23h, mostrando o litoral do Rio de Janeiro próximo a Cabo Frio. A escala de temperaturas encontra-se a direita. Os valores em tons azuis correspondem às baixas temperaturas (< 19°C) típicas da ressurgência. O continente e as nuvens estão mascarados em branco. A isóbata de 200 m de profundidade foi sobreposta à imagem..... 18

Figura 3 – Imagem termal processada do AVHRR/NOAA-14, de 08/08/2000, do litoral norte do RJ. Os tons azuis representam temperaturas mais frias enquanto que os tons amarelos e vermelhos têm valores de TSM mais altos (ver tabela de cores na figura). As setas mais largas indicam o sentido horário de rotação dos vórtices ciclônicos. As setas menores indicam a posição da frente termal. 20

Figura 4 – Imagem da concentração de clorofila-a superficial obtidas a partir do sensor SeaWiFS em 09/08/2000 sobre a costa sudeste brasileira. Os tons azuis correspondem a baixas concentrações de pigmentos. Os tons amarelo a vermelhos indicam concentrações mais altas de clorofila (notar a tabela logarítmica de cores na parte inferior da figura). As setas pequenas indicam a presença de uma frente oceânica. A seta mais larga indica o sentido de rotação do vórtice ciclônico ao largo de S. Tomé. As isóbatas de 500, 1000, 2000 e 3000 m de profundidade foram sobrepostas à imagem. 23

Figura 5 – Produtividade primária fitoplanctônica integrada média para o mês de agosto de 1998 estimada a partir de imagens SeaWiFS. A tabela de cores correspondentes aos valores de produtividade em g.C.m⁻² encontra-se na parte inferior da figura. 25

Figura 6 – Mosaico de imagens Landsat 7, sensor ETM+, composição colorida 3B4G5R, do Baixo do Parnaíba (PI, MA e CE). 26

Figura 7 – (a) Esquema de um derivador de baixo custo, padrão WOCE, rastreado por satélite. A parte submersa encontra-se em tons de azul. (b) Fotografia de um derivador padrão WOCE construído pelo INPE. 27

1 APRESENTAÇÃO

A Terra é um planeta aquático com dois terços de sua superfície coberta por água. Mais da metade da radiação solar que chega à superfície terrestre é

primeiro absorvida pelos oceanos, onde é armazenada e redistribuída pelas correntes marinhas antes de ser liberada para a atmosfera.

Enquanto que a atmosfera e os continentes suportam grandes variações de temperatura nas altas e médias latitudes, a temperatura do oceano permanece mais constante. O alto calor específico da água do mar impede que a amplitude da temperatura varie rapidamente ao longo do dia.

Os processos atuantes nos oceanos são também importantes em relação à absorção de gases. Eles podem atrasar ou reduzir o impacto do aquecimento global provocado pelo aumento nas taxas de dióxido de carbono provenientes da queima de combustíveis fósseis.

Além do aspecto climático e meteorológico, os oceanos são importantes por outros motivos: o comércio internacional se utiliza muito dos meios marinhos, e programas de defesa nacionais são cada vez mais dependentes de operações navais. Da mesma forma, os recursos pesqueiros abastecem uma fração significativa da proteína consumida mundialmente. Além disso, a física, química, biologia e geologia dos oceanos são fundamentais para o desenvolvimento e gerenciamento desses recursos vivos. Os oceanos também, assimilam grande, se não a maior parte da poluição antropogênica, desde derramamentos de óleo, esgotos domésticos e industriais, até lixo atômico.

No fundo oceânico existem grandes depósitos de minerais valiosos – óleo e fontes potenciais de minerais estratégicos. Os depósitos oceânicos fornecem um quadro da evolução climática global ao longo de milhões de anos. A topografia do solo oceânico e suas propriedades magnéticas fornecem, similarmente, uma visão da evolução das crostas oceânica e continental.

Por mais de um século, os oceanógrafos vem elaborando uma descrição científica dos oceanos a partir de medições realizadas no mar. Entretanto, essa descrição é limitada pela cobertura esparsa de dados na maioria dos oceanos do planeta. Os dados obtidos tendem a vir de navios (de pesquisa ou de

oportunidade) que muitas vezes são obrigados a alterar suas rotas normais em função de condições meteorológicas adversas ou pela presença de gelo no mar. Grandes áreas oceânicas, particularmente no Hemisfério Sul, são pouco visitadas por quaisquer navios. Além disso, os oceanos apresentam uma grande variabilidade espaço-temporal, necessitando de medições freqüentes em locais bem distribuídos ao redor de todo o globo terrestre.

O sensoriamento remoto a partir de instrumentos orbitais ou aerotransportados, fornece uma visão sinóptica dos oceanos, que associada a recursos computacionais cada vez mais sofisticados, apresenta novas perspectivas para a descrição e o entendimento dos oceanos. A quantidade de parâmetros oceanográficos que podem ser medidos e monitorados por sensoriamento remoto é bem ampla. As aplicações dos dados orbitais são tão diversas que podemos considerar este meio de aquisição de informações para a oceanografia como um todo – biológica, química, geológica e física – tão eficaz como as informações obtidas por meios convencionais.

Este capítulo “Sensoriamento Remoto Aplicado à Oceanografia” pretende apresentar, de forma resumida, alguns aspectos relacionados à Oceanografia e ao Sensoriamento Remoto dos oceanos, além de alguns exemplos de aplicações da tecnologia espacial no estudo oceanográfico. Espero que seja útil.

Milton Kampel
Julho de 2002
São José dos Campos - SP

2. INTRODUÇÃO

2.1 O QUE É OCEANOGRAFIA

Segundo o dicionário, a Oceanografia é o “estudo das características físicas e biológicas dos oceanos e dos mares”. Já segundo a UNESCO, a Oceanografia é uma “ciência universal, que tem por objetivo o estudo do meio marinho, sua flora, sua fauna e seus limites físicos com a terra firme e a atmosfera. Como

qualquer outra ciência, ela se baseia no método experimental (...). Devido às grandes dimensões dos fenômenos oceânicos e do fato de que eles raramente são gerados num mesmo lugar, a oceanografia depende da cooperação internacional”.

Na verdade, a Oceanografia é uma disciplina multi e interdisciplinar, envolvendo diversas áreas como a Meteorologia, Paleontologia, Cartografia, Engenharia, Sensoriamento Remoto, Administração/Marketing, entre outras. A Oceanografia pode ser considerada como o estudo científico dos oceanos com ênfase no seu caráter como Ambiente. É convenientemente dividida em: Oceanografia Biológica, Oceanografia Física, Oceanografia Química e Oceanografia Geológica.

O principal objetivo do estudo oceanográfico é obter uma descrição sistemática dos oceanos, suficientemente quantitativa para permitir a previsão de seu comportamento com algum grau de certeza.

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO E OCEANOGRAFIA

O Sensoriamento Remoto não está limitado a geração e interpretação de dados na forma de imagens. Por exemplo, dados de pressão, temperatura e umidade em diferentes níveis da atmosfera são rotineiramente coletados por serviços meteorológicos, através do emprego de balões e foguetes meteorológicos. Informações científicas sobre diferentes níveis atmosféricos também são coletadas por métodos de rádio-sondagens operados tanto por estações terrestres, como a bordo de satélites.

Ondas ultra-sônicas, apesar de serem fortemente atenuadas na atmosfera, podem se propagar por grandes distâncias submarinas. Daí sua aplicabilidade em medições das profundidades em rios ou oceanos (batimetria), inspeções submarinas, caça de minas submersas, detecção de cardumes e comunicações submarinas.

Como já mencionado anteriormente, a descrição científica dos oceanos a partir de medições realizadas no mar é limitada pela cobertura esparsa de dados na maioria dos oceanos do planeta. Por outro lado, a quantidade de parâmetros oceanográficos que podem ser medidos com o emprego de tecnologia espacial é bem ampla.

Se por um lado, alguns oceanógrafos mais conservadores afirmam que as informações obtidas por satélites não podem ser tão precisas ou relevantes como quando coletadas por embarcações de pesquisa, cabe lembrar que técnicas de sensoriamento remoto tem sido empregadas, ao longo dos anos, por vários oceanógrafos utilizando métodos acústicos nos oceanos. Ondas sonoras tem sido utilizadas para estudos do fundo e subfundo marinho, para observação do material em suspensão na água do mar, para estudos biológicos, determinações de estruturas termohalinas, medições de velocidade pelo efeito Doppler etc.

Desta forma, não haveria nenhuma objeção fundamental impedindo a extensão das técnicas de sensoriamento remoto nos oceanos, com a utilização das ondas eletromagnéticas através da atmosfera.

A representatividade dos dados de sensoriamento remoto para parâmetros oceanográficos dependentes da profundidade ou que apresentem variações temporais de alta frequência é válida, na medida em que se analisam três aspectos:

- 1) Inicialmente, para quaisquer variações que ocorram em profundidades nos oceanos, são os parâmetros superficiais - temperatura, velocidades, concentrações salinas, de gases dissolvidos etc. - que controlam as interações energia/matéria entre o oceano e a atmosfera. Desta forma, apesar da coleta de dados via SR ocorrer em apenas uma única profundidade, praticamente, trata-se do nível mais importante, ou seja, a superfície;

- 2) Outros aspectos positivos a serem considerados são: a visão sinóptica, a alta resolução espacial (para determinados sensores) e a possibilidade de se obter séries temporais de dados consistentes por longos períodos, mesmo para locais oceânicos isolados;
- 3) Ainda, podemos considerar o fato de que os dados obtidos via SR incorporam um valor médio, por unidade de área, automaticamente, sendo particularmente relevantes para testar previsões de modelos numéricos.

2.3 POTENCIALIDADES DA TECNOLOGIA ESPACIAL NA OBSERVAÇÃO DOS OCEANOS

É conveniente classificar os sensores e instrumentos de SR de acordo com o comprimento de onda eletromagnética usada, ou seja, as regiões do visível (óptico), infravermelho-próximo, infravermelho-termal, microondas e ondas de rádio. Outra classificação importante, separa os sensores passivos dos sensores ativos. Em um sistema passivo, o instrumento de SR simplesmente detecta qualquer radiação que esteja no comprimento de onda (ou bandas espectrais) para a qual o instrumento foi projetado. Em um sistema ativo, o próprio instrumento de SR gera radiação, transmite esta radiação em direção ao alvo, e extrai informações a partir do sinal de retorno.

Robinson (1985) classifica os sensores de comprimento de onda visível como passivos em relação à fonte de radiação inicial, a iluminação do sol. Esta é refletida pelo mar e atinge o satélite, de forma que a informação que se busca por meio do imageamento da cor da água está relacionada com os processos de reflexão e retroespalhamento. Uma vez que o sensor evite a reflexão direta da luz solar, a radiação ascendente conterá informações conseqüentes dos processos de retroespalhamento do corpo d'água. Os sensores que atuam na região espectral do visível respondem diretamente às condições da parte superior da coluna d'água. Em águas claras, a luz refletida pelo fundo pode ser vista do espaço, e sua intensidade depende do tipo de fundo e da

profundidade, tornando assim a batimetria e a identificação de diferentes tipos de fundo duas aplicações viáveis para estes sensores.

Os sensores do infravermelho-próximo apresentam um caráter de complementaridade em relação aos do visível, ainda que a absorção da água aumente para comprimentos de onda maiores que 800 nm, de forma mais rápida. Sensores operando na faixa entre 3 μm e 4 μm registrarão quantidades apreciáveis de energia solar refletida durante o período diurno, mas no período noturno, registrarão a radiação emitida pela superfície do mar.

Esta radiação emitida é predominante para comprimentos de onda entre 10 μm e 12 μm , de forma que, sensores operando na faixa do infravermelho-termal podem ser utilizados para estimar a temperatura da superfície do mar.

Ainda que os lasers tenham sido mais empregados para sondar a atmosfera, cada vez mais eles são instalados em aeronaves e navios, voltados diretamente para baixo, para investigar a hidrosfera. O SR dos oceanos, lagos e rios é possível por meio das radiações visível, infravermelha e microondas. Os lasers operando numa ampla faixa do espectro, tem dado uma nova dimensão às pesquisas hidrográficas e oceanográficas, permitindo um alto grau de resolução em profundidade e uma pesquisa subsuperficial que é inatingível por outras técnicas de SR.

Os radiômetros passivos são equipamentos que medem o fluxo de energia eletromagnética que chega aos seus sensores direcionalmente. Medem comprimentos de onda até a região de microondas, e podem ser utilizados na determinação da temperatura da superfície do mar. A radiação emitida pela superfície marinha depende da emissividade desta (ou seja, o fluxo radiante emitido por uma superfície, dividido por sua área denomina-se “exitância radiante”; a emissividade é a razão entre a exitância radiante de um corpo e a exitância radiante de um corpo negro a uma mesma temperatura). Se fossem realizadas medições em várias bandas espectrais, no infravermelho e nas

microondas, seria possível, em princípio, obter informações da emissividade e dos parâmetros dos quais ela depende, incluindo aí a salinidade, películas superficiais de óleo, fluxos de calor superficial, etc.

Sensores de microondas ativos são desenvolvidos para aplicações específicas, como o estudo de correntes, marés, estado-do-mar, velocidade e direção de ventos superficiais, espectro direcional de ondas, ondas internas, entre outras. A possibilidade de aplicações dos sensores ativos ainda pode ser bastante desenvolvida.

Os sensores de microondas ativos utilizam o retroespalhamento das ondas eletromagnéticas na superfície marinha para obter informações a nível orbital, mesmo na presença de nuvens. Pelo registro do tempo de retorno de um pulso emitido na direção nadir (isto é, na vertical do local), o radar altímetro consegue medir a altitude da superfície marinha, em relação à sua própria posição. Uma vez que sua posição possa ser definida precisamente, é possível determinar a altitude da superfície marinha em relação ao geóide terrestre. Esta informação é útil no estudo de marés e da circulação oceânica. Além disso, a deformação do pulso refletido transporta informações sobre a altura de ondas significativas.

O radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*) é capaz de processar a medição do tempo e da fase do sinal retroespalhado, e de sua amplitude. Este processamento permite a produção de uma imagem do retroespalhamento da superfície, ou seja, da rugosidade desta superfície como é vista pelo radar. É possível obter uma resolução espacial na ordem de dezenas de metros. A rugosidade medida é causada por pequenas ondas, de poucos centímetros de comprimento. Esta técnica orbital permite detectar ondas de gravidade, ondas internas, feições topográficas de fundo, esteiras de navios, derramamentos de óleo, etc.

Outra tecnologia espacial cada vez mais utilizada no monitoramento oceânico é o emprego de plataformas remotas para a aquisição de dados com telemetria via satélite. Bóias de deriva ou ancoradas medem *in situ* diferentes parâmetros

oceanográficos e meteorológicos em diferentes regiões do oceano mundial, transmitindo os dados via satélites. Estes dados são utilizados em estudos da circulação oceânica, transporte de calor, calibração de imagens orbitais termais, entre outras aplicações.

Atualmente, os benefícios do SR na Oceanografia brasileira ainda são restritos. O planejamento, gerenciamento e monitoramento de recursos naturais necessitam de dados constantemente atualizados, que possam ser interrelacionadas em diferentes conjuntos de informações para auxiliar a tomada de decisão de forma ampla e objetiva.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são ferramentas computacionais para Geoprocessamento que permitem realizar análises complexas, integrando dados de diversas fontes e criando bancos de dados georreferenciados. Os SIG's são normalmente utilizados para a produção de mapas, como suporte para a análise espacial de fenômenos, como um banco de dados geográficos com funções de armazenamento e recuperação de informações espaciais, e ainda na modelagem de processos e fenômenos naturais permitindo o diagnóstico ambiental e seus prognósticos.

Num ambiente computacional, a noção de mapa deve ser estendida para incluir diferentes tipos de dados como imagens de satélites, modelos numéricos e dados coletados *in situ*. Um SIG é capaz de integrar numa única base de dados, informações espaciais provenientes de imagens de satélites, mapas cartográficos, arquivos batimétricos, dados oceanográficos e meteorológicos históricos, dados coletados *in situ*, entre outros. O SIG oferece também, mecanismos para combinar as várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, e para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

3. APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO EM OCEANOGRAFIA

3.1 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR

As imagens infravermelhas dos oceanos obtidas, por satélites, têm sido utilizadas no estudo de diversos fenômenos e processos oceanográficos como as correntes marinhas, as frentes oceânicas, eventos de ressurgência, processos de mistura nas águas costeiras, a partir da observação de variações na temperatura da superfície do mar (TSM).

Inicialmente, só se obtinham dados de satélites no infravermelho na forma fotográfica como subproduto de imagens meteorológicas. A medida em que dados digitais em maior quantidade e melhor qualidade foram sendo disponibilizados, foi sendo possível efetuar estimativas quantitativas da TSM. Estas estimativas tornaram-se possíveis tanto com a utilização de medições realizadas em apenas uma banda espectral, como combinando-se medições de diferentes canais espectrais, obtendo-se desta forma, dados mais precisos (cerca de 0,5°C). Os dados digitais podem ainda, ser realçados radiometricamente para a geração de imagens capazes de mostrar pequenas variações de temperatura. Da mesma forma, uma precisa correção geométrica destas imagens permite a realização de análises multitemporais ou então, de dados provenientes de diferentes fontes (por exemplo, outros sensores, coletados por embarcações, etc.).

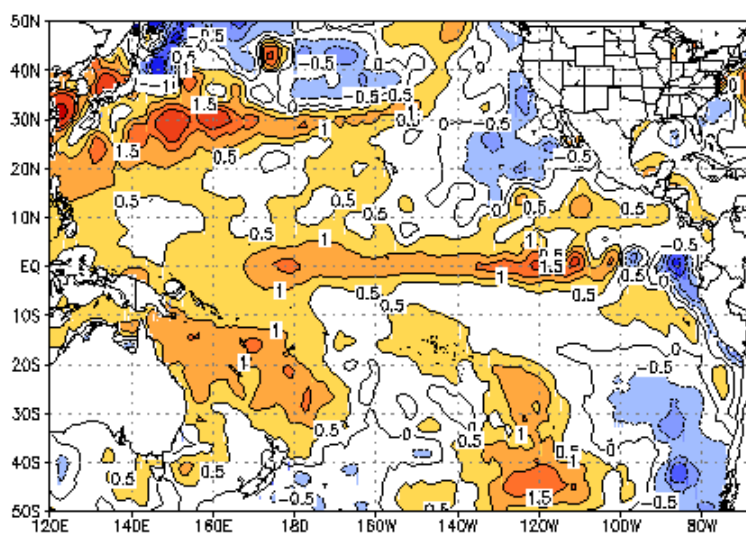
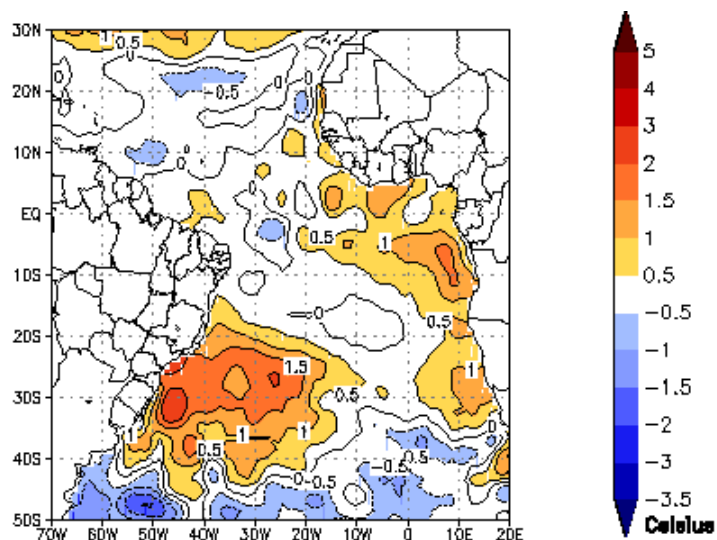
A obtenção da TSM a partir de radiômetros de infravermelho tem sido empregada em diversas aplicações oceanográficas tais como em estudos de mudanças climáticas globais, identificação de ressurgências, vórtices, meandramentos e frentes, fornecimento de suporte à pesca de peixes pelágicos, monitoramento dos campos de TSM e/ou correntes oceânicas superficiais, entre outros. Na literatura nacional e internacional, podem ser encontrados diversos trabalhos que demonstram a utilidade das imagens termais em estudos oceanográficos.

3.1.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A Figura 1 mostrada a seguir ilustra os campos médios de anomalia de temperatura da superfície do mar entre 18 e 24 de junho de 2002, para os Oceanos Atlântico e Pacífico, respectivamente. Estes mapas foram produzidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE a partir de dados de satélites disponibilizados pelo Centro de Previsão do Tempo dos Estados Unidos – NCEP/NOAA.

As anomalias de temperatura da superfície do mar são calculadas pelos desvios dos valores de TSM em relação a médias climatológicas obtidas por séries longas de dados de satélites.

Nesta figura, podemos observar que os valores de TSM estão indicando uma evolução gradual do fenômeno El Niño no Oceano Pacífico. No Oceano Atlântico Sul, as águas superficiais entre a América do Sul e a costa oeste e sul da África permanecem quentes em relação a semanas anteriores. Já no Atlântico Norte, notam-se desvios negativos da TSM próximos à costa noroeste da África, sugerindo a presença de uma banda de nebulosidade normalmente associada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Neste caso, a posição atual da ZCIT estaria ligeiramente ao sul da sua posição média climatológica.



Fonte de dados: NCEP/NOAA – EUA

Elaboração: CPTEC/INPE

Figura 1 – Anomalia de temperatura da superfície do mar, entre 18 e 24 de junho de 2002, nos Oceanos Atlântico (parte superior) e Pacífico (parte inferior). A escala de temperaturas encontra-se a direita, em cima.

Eventos como o El Niño, que causam enormes prejuízos materiais e até perdas de vidas humanas, e o potencial efeito do aquecimento global devido ao aumento nos níveis de dióxido de carbono na atmosfera proveniente da queima de combustíveis fósseis (efeito estufa), enfatizam a importância do monitoramento oceânico realizado com auxílio de satélites para estudos e previsões climáticas.

3.1.2 RESSURGÊNCIAS

A Figura 2 mostra a ocorrência de um evento de ressurgência costeira na região de Cabo Frio, RJ. A imagem termal foi adquirida pelo sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), instalado a bordo do satélite NOAA-12, na madrugada de 15 de dezembro de 2000. Os tons em vermelho ao largo na imagem com valores altos de TSM ($>23^{\circ}\text{C}$) estão associados à Corrente do Brasil. Esta corrente quente, salina e pobre em sais nutrientes, banha grande parte da costa brasileira.

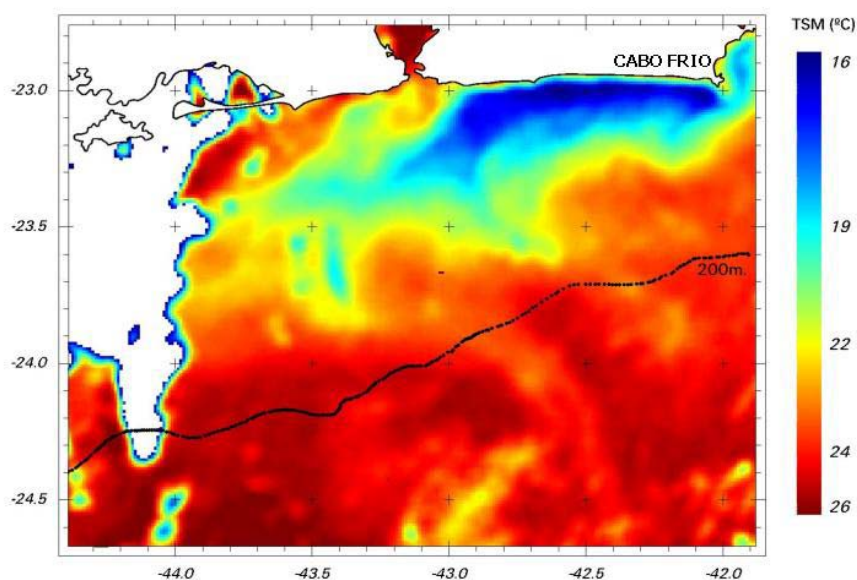


Figura 2 – Carta-imagem da temperatura da superfície do mar, produzidas a partir de imagens do satélite NOAA-12, às 05:23h, mostrando o litoral do Rio de Janeiro próximo a Cabo Frio. A escala de temperaturas encontra-se a direita. Os valores em tons azuis correspondem às baixas temperaturas ($< 19^{\circ}\text{C}$) típicas da ressurgência. O continente e as nuvens estão mascarados em branco. A isóbata de 200 m de profundidade foi sobreposta á imagem.

Na região de Cabo Frio, quando sopram ventos intensos e constantes do quadrante NE, ocorre o fenômeno da ressurgência. As águas de subsuperfície, mas frias e ricas em nutrientes, são bombeadas para níveis mais rasos, chegando a aflorar na superfície. A presença destas águas subsuperficiais pode ser facilmente notada na imagem da Figura 2 em tons azuis, com TSM's abaixo de 19°C .

3.1.3 VÓRTICES E FRENTES

A Figura 3 apresenta uma imagem termal, processada, do satélite NOAA-14 obtida em 8 de agosto de 2000 sobre o litoral norte do RJ. Os tons vermelhos na imagem, com valores de TSM acima de 23°C estão associados à Corrente do Brasil, fluindo de nordeste para sudoeste.

As águas sobre a plataforma continental, com TSM's mais baixas (< 22°C), ficam separadas das águas quentes da Corrente do Brasil por uma frente termal, onde são observados intensos gradientes horizontais de temperatura. Nestas regiões oceânicas ocorrem agregações passivas de organismos com pouca ou nenhuma capacidade natatória que servem de alimento para outros consumidores mais evoluídos. Daí seu interesse para a pesca oceânica de peixes pelágicos e outros recursos marinhos. A posição aproximada da frente está assinalada na Figura 3 por pequenas setas sucessivas.

Entre as latitudes 22°-23°S e as longitudes 40°-41°W, e em torno da posição 24°S-42°W, podemos notar a presença de dois vórtices ciclônicos, com rotação no sentido horário (ver indicação das setas mais largas na Figura 3). Estas estruturas de mesoescala provocam misturas verticais e horizontais de águas com características físicas e químicas diferentes. Desta forma, processos biológicos nestas regiões acabam sendo influenciados por estes forçantes físicos alterando temporariamente a estrutura e o funcionamento do ecossistema.

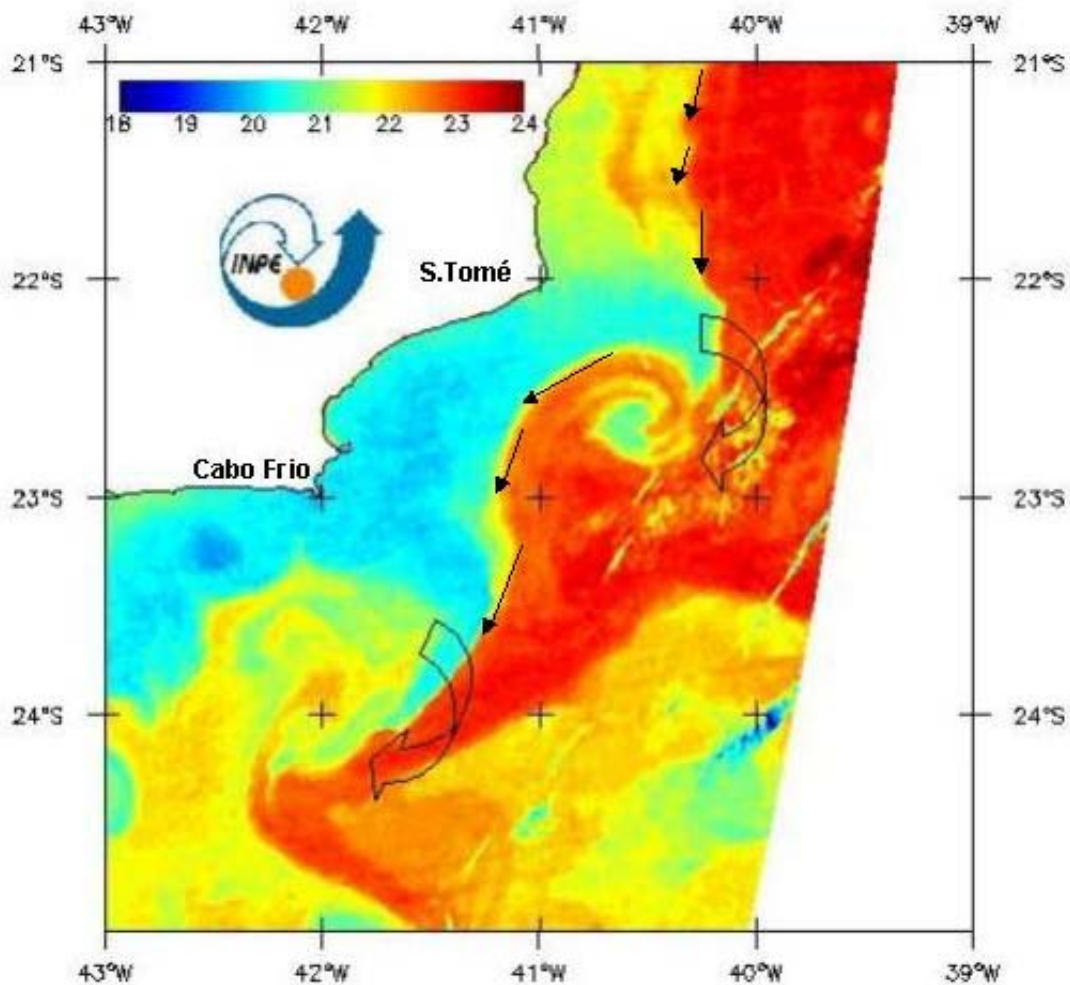


Figura 3 – Imagem termal processada do AVHRR/NOAA-14, de 08/08/2000, do litoral norte do RJ. Os tons azuis representam temperaturas mais frias enquanto que os tons amarelos e vermelhos têm valores de TSM mais altos (ver tabela de cores na figura). As setas mais largas indicam o sentido horário de rotação dos vórtices ciclônicos. As setas menores indicam a posição da frente termal.

3.2 COR DA ÁGUA

A cor do oceano é resultante da energia solar retroespalhada pela superfície marinha e pela coluna d'água. O azul escuro do oceano profundo é típico de águas com baixas concentrações de organismos fitoplanctônicos (algas unicelulares marinhas) ou outras substâncias opticamente ativas (materiais

orgânico e inorgânico). A medida que se aproxima da costa, a entrada de nutrientes no ambiente aquático geralmente aumenta, com conseqüente desenvolvimento de maiores concentrações de fitoplâncton e mudança de cor do azul para o verde.

O fitoplâncton altera as propriedades ópticas da água do mar (Yentsch, 1959; Clarke *et al.*, 1970). Quanto mais próximo da costa, maior a contribuição de sedimentos e material dissolvido provenientes do continente. A cor da água muda para amarelo-marron chegando a vermelha em certas circunstâncias.

Estas cores percebidas pelo olho humano podem ser quantificadas por medidas da distribuição espectral da radiância ascendente da água realizadas por sensores instalados em satélites.

Avaliações quantitativas das propriedades bio-ópticas da água do mar requerem métodos precisos de correção atmosférica, visto que, cerca de 90% do sinal detectado pelos sensores orbitais provêm da atmosfera.

Assumindo que a contribuição atmosférica ao sinal do satélite pode ser estimada, resta interpretar a radiância ascendente resurgente da água em termos das características ópticas das camadas superiores do oceano (ou em termos das variações nas concentrações e tipos de material dissolvido e particulado que contribuem para variações nestas propriedades ópticas). As equações utilizadas nestes procedimentos são coletivamente referidas como algoritmos bio-ópticos (Smith e Baker, 1978; Clark, 1981).

Da irradiância que chega aos oceanos, 90% retorna à atmosfera e é proveniente da primeira profundidade óptica, ou seja, da profundidade até onde a irradiância é reduzida a 37% ($1/e$) do seu valor na superfície (Gordon e McCluney, 1975). Por isso, a determinação da concentração de pigmentos, através do sensoriamento remoto orbital, é restrito a esta camada.

Apesar destas limitações, aliadas à cobertura por nuvens, tem se desenvolvido diversas aplicações oceanográficas com a utilização de dados orbitais da cor do oceano. Entre estas, podemos citar os estudos de processos dinâmicos de correntes de maré, lançando mão da distribuição de sedimentos em suspensão como traçador. Estas imagens podem ainda ser utilizadas para monitorar plumas de sedimentos carregados por rios para a região costeira, servindo como indicadores auxiliares no controle da poluição marinha. Da mesma forma, plumas de efluentes domésticos e/ou industriais também podem ser monitorados com esta tecnologia. A cor da água do mar é, algumas vezes, alterada pela presença de determinados tipos de poluentes.

A obtenção rotineira de dados quantitativos das propriedades bio-ópticas dos oceanos permite ainda o exame dos fatores oceânicos que afetam as mudanças globais. Desta forma, torna-se possível avaliar o papel dos oceanos no ciclo global do carbono, assim como em outros ciclos biogeoquímicos, através de programas de pesquisa abrangentes.

3.2.1 CONCENTRAÇÕES SUPERFICIAIS DE CLOROFILA

Rotineiramente, os dados da cor do oceano obtidos por satélites são empregados para estimar as concentrações de clorofila na superfície do mar. A partir de imagens da concentração superficial de pigmentos, como a clorofila-a, é possível observar sinopticamente feições biológicas de sistemas dinâmicos como os grandes giros subtropicais, frentes oceânicas, ressurgências e vórtices de mesoescala (Peláez e McGowan, 1986; Biggs e Müller-Karger, 1994; Santamaria-del-Angel *et al.*, 1994; Monger *et al.*, 1997; entre outros). Laurs e Brucks (1985) demonstraram a utilização dos mapas de concentração de pigmentos no estudo da distribuição de capturas de tunídeos.

Segundo Hooker e McClain (2000), os mapas de concentrações de clorofila-a obtidos atualmente têm acurácia de $\pm 30\%$ no intervalo entre 0,05-50 mg.m⁻³.

A Figura 4 apresentada a seguir mostra os campos superficiais de concentração de clorofila-a obtidos pelo processamento da imagem SeaWiFS de 09/08/2000. Os tons azuis correspondem a baixas concentrações de pigmentos, típicas das águas oligotróficas da Corrente do Brasil. Os tons de amarelo a vermelho correspondem a águas mais ricas em clorofila, normalmente localizadas mais próximo à costa. As setas pequenas na imagem indicam a presença de uma frente oceânica formada entre as águas pobres e oceânicas da Corrente do Brasil, e as águas mais ricas sobre a plataforma.

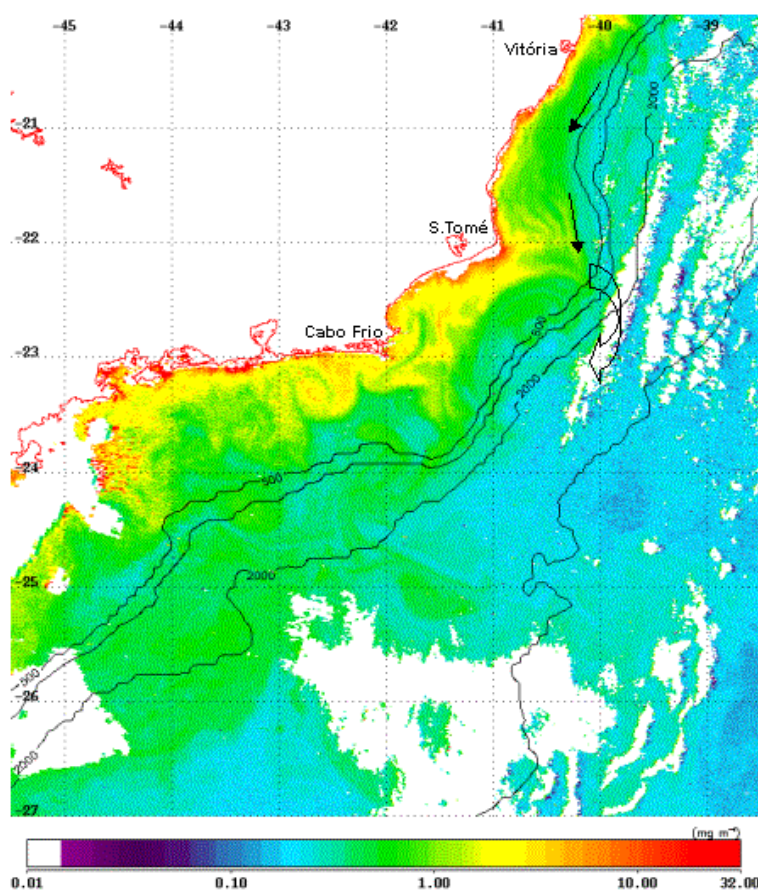


Figura 4 – Imagem da concentração de clorofila-a superficial obtida a partir do sensor SeaWiFS em 09/08/2000 sobre a costa sudeste brasileira. Os tons azuis correspondem a baixas concentrações de pigmentos. Os tons amarelo a vermelhos indicam concentrações mais altas de clorofila (notar a tabela logarítmica de cores na parte inferior da figura). As setas pequenas indicam a presença de uma frente oceânica. A seta mais larga indica o sentido de rotação do vórtice ciclônico ao largo de S. Tomé. As isóbatas de 500, 1000, 2000 e 3000 m de profundidade foram sobrepostas à imagem.

A seta mais larga quase em frente a Cabo de São Tomé, indica o sentido de rotação de um vórtice ciclônico presente na imagem. Feições oceanográficas de mesoescala também podem ser visualizadas em imagens da cor do oceano, da mesma forma como em imagens termais.

3.2.2 PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA

A velocidade com que as concentrações de clorofila variam no tempo e/ou quanta fotossíntese está ocorrendo durante o dia é chamada de produtividade primária (primária porque é a fase inicial e crítica da teia alimentar). A análise de séries temporais de imagens da cor do oceano permite que se conheça a magnitude e a variabilidade das concentrações de clorofila e da produtividade primária em escala global. Com isso, pode-se tentar quantificar as relações entre a física dos oceanos e os padrões de produtividade em grande e mesoescala (McClain *et al.*, 1992).

A Figura 5 mostra um mapa médio da produtividade primária fitoplanctônica integrada na coluna d'água (g.C.m^{-2}) para o mês de agosto de 1998. A tabela de cores aparece na parte inferior da figura. Os tons azuis, típicos de águas oceânicas pobres, correspondem aos menores valores de produtividade. Os tons de verde a vermelho, correspondentes a valores de produção primária mais altos, são encontrados em regiões costeiras, de divergência equatorial e em áreas de ressurgência. É interessante notar a mais alta produtividade do Oceano Atlântico Norte em relação ao Atlântico Sul, nesta época do ano.

Este mapa foi obtido a partir de um algoritmo semi-analítico baseado na relação fundamental entre fotossíntese e luz. A produção primária é expressa como função da biomassa fitoplanctônica e da irradiância disponível em diferentes níveis de profundidades. A biomassa fitoplanctônica na camada superficial é determinada pela concentração de clorofila-a obtida por imagens da cor do oceano. A irradiância disponível na superfície do mar foi calculada por modelos de transferência radiativa (Gregg e Carder, 1990), e a irradiância

disponível abaixo da superfície do mar foi estimada por modelos de atenuação na coluna d'água (Sathyendranath e Platt, 1988).

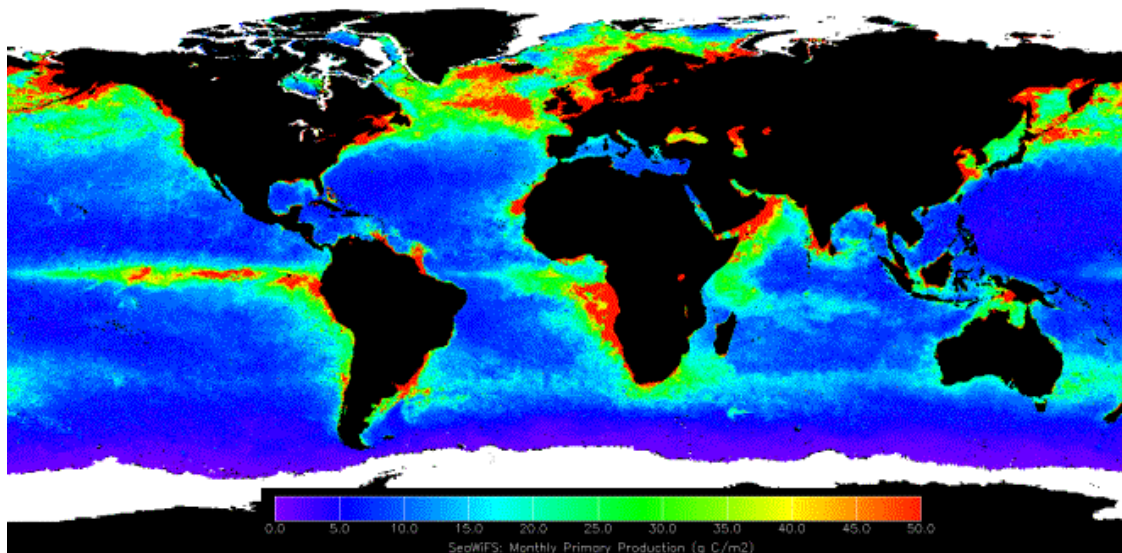


Figura 5 – Produtividade primária fitoplanctônica integrada média para o mês de agosto de 1998 estimada a partir de imagens SeaWiFS. A tabela de cores correspondentes aos valores de produtividade em g.C.m⁻² encontra-se na parte inferior da figura.

3.2.3 GERENCIAMENTO COSTEIRO

A Zona Costeira abriga um mosaico de ecossistemas de alta relevância ambiental, cuja diversidade é marcada pela transição de ambientes terrestres e marinhos, com interações que lhe conferem um caráter de fragilidade. A maior parte da população mundial vive em zonas costeiras, e há uma tendência permanente ao aumento da concentração demográfica nessas regiões. Em síntese, pode-se dizer que a sustentabilidade das atividades humanas nas zonas costeiras depende de um meio marinho saudável e vice-versa.

Desta forma, a atividade de gerenciamento deste amplo universo de trabalho implica, fundamentalmente, na construção de um modelo cooperativo entre os diversos níveis e setores do governo, e deste com a sociedade.

O Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) é um dos instrumentos do Gerenciamento Costeiro que baliza o processo de ordenamento territorial

necessário para a obtenção das condições de sustentabilidade ambiental do desenvolvimento da Zona Costeira.

A Figura 6 a seguir mostra a área do Baixo Rio Parnaíba, entre os estados do PI, MA e CE, incluindo o seu delta. Incorporando a área marinha, até a isóbata de 20 m, à porção terrestre, tem-se uma área total de 16.744,25 km². Esta região é alvo de diferentes interesses que visam a alterar suas condições de uso e ocupação. O avanço da ocupação sobre a área e a intensificação de alguns usos têm aumentado as ameaças quanto à degradação ambiental e à dilapidação do patrimônio natural. Para garantir a sustentabilidade do seu desenvolvimento, foi elaborado um ZEE como um passo importante para orientar planos de gestão.

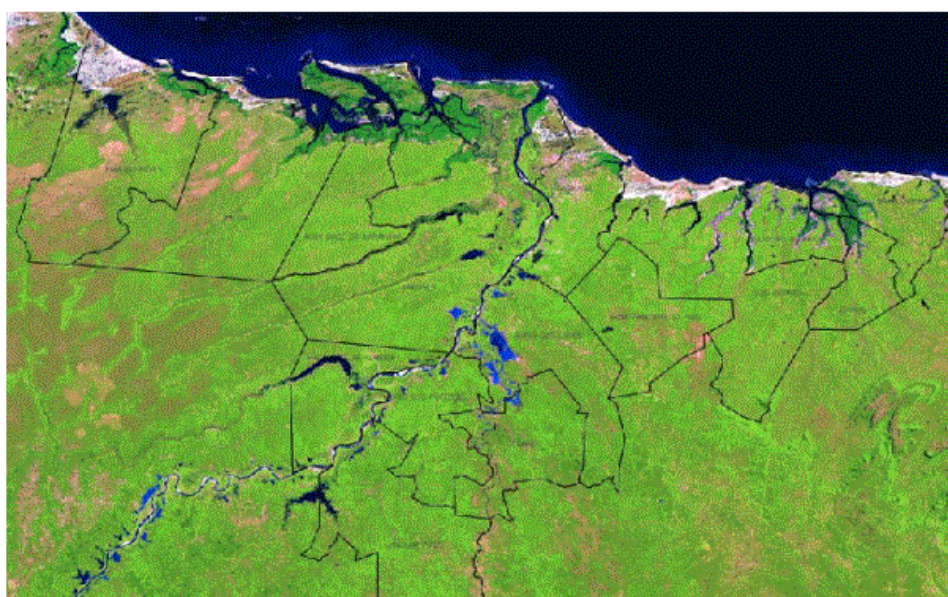


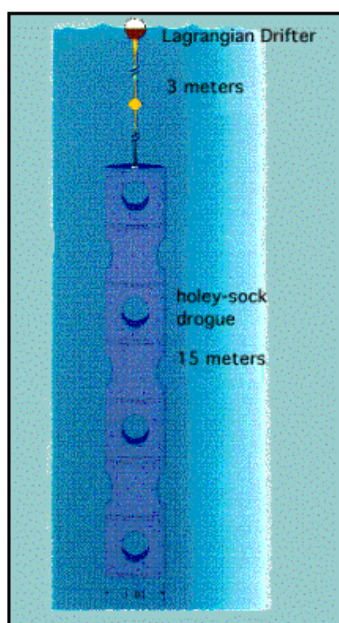
Figura 6 – Mosaico de imagens Landsat 7, sensor ETM⁺, composição colorida 3B4G5R, do Baixo do Parnaíba (PI, MA e CE).

3.3 BÓIAS RASTREADAS POR SATÉLITES

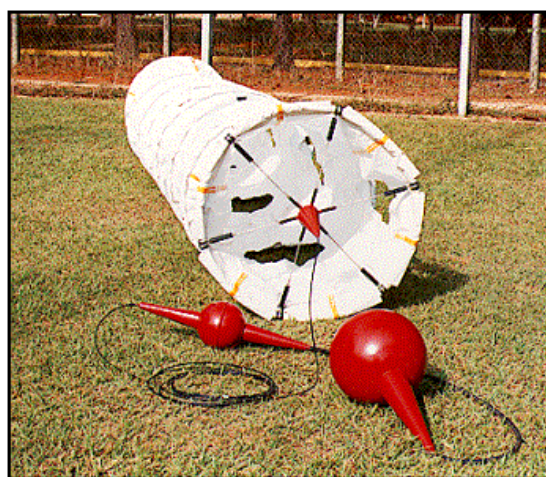
Como mencionado anteriormente, existem outros tipos de dados úteis aos estudos oceanográficos, que não na forma de imagens, mas que podem ser obtidos com auxílio da tecnologia espacial.

Bóias ancoradas e derivadores rastreados por satélites, têm sido desenvolvidos e utilizados pelo INPE desde 1985, para estudos ambientais e oceanográficos nas regiões da Antártica, Oceano Atlântico Sudoeste, e Atlântico Tropical. O índice de aproveitamento utilizando a telemetria de dados por satélites, como por exemplo, através do Sistema Argos, têm sido excelente, o que nos motiva a continuar trabalhando desta forma.

Atualmente temos em atividade 10 derivadores de baixo custo, padrão WOCE (Figura 7), na costa brasileira. Suas trajetórias, bem como os dados de temperatura da água e pressão ao nível do mar coletados por eles, podem ser acessados pela internet em: <http://www.dsr.inpe.br/pnboia/pnboia.html>



(a)



(b)

Figura 7 – (a) Esquema de um derivador de baixo custo, padrão WOCE, rastreado por satélite. A parte submersa encontra-se em tons de azul. (b) Fotografia de um derivador padrão WOCE construído pelo INPE.

Pelo menos outros 50 derivadores do mesmo tipo foram lançados na nossa costa, nos últimos anos, estando atualmente inativos. O Programa Nacional de Bóias, conduzido pelo INPE e pela Marinha do Brasil, pretende continuar lançando outros derivadores nos próximos anos.

Os dados coletados por estes derivadores são utilizados em estudos da circulação oceânica, transporte de calor, calibração de imagens orbitais termais, previsões meteorológicas marinhas, entre outras aplicações.

O Projeto Pirata (<http://www4.cptec.inpe.br/pirata/>) é uma iniciativa internacional, com participação do INPE que pretende estudar as interações entre o oceano e a atmosfera na região do Atlântico Tropical que sejam relevantes para os estudos sobre as mudanças climáticas. De um total de 12 bóias fundeadas em atividade atualmente, 6 estão sob responsabilidade do Brasil. Os dados oceanográficos e meteorológicos adquiridos automaticamente por estas bóias são transmitidos via Sistema ARGOS. Depois de processadas, todas as informações são disponibilizadas pela internet.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além dos exemplos de aplicações apresentados acima, cabe mencionar que diversos outros parâmetros e variáveis de interesse oceanográfico também são obtidos com o emprego de tecnologia espacial. Como exemplo, podemos citar: a detecção de derrames de óleo no mar através de radares de abertura sintética, intensidade e direção dos ventos superficiais, altura e direção de ondas, entre outros, através de altímetros e escaterômetros.

Esperamos ter demonstrado, ainda que de forma sucinta, a capacidade dos satélites de pesquisa em medir parâmetros e/ou variáveis oceânicas importantes para o clima, monitoramento ambiental, pesca, transporte marítimo, segurança nacional, etc. Mesmo com a tecnologia espacial

atualmente disponível, ainda existe uma insuficiência de informações em muitas regiões do nosso planeta.

Diversos projetos de pesquisa que utilizam dados coletados por satélites têm ampliado o nosso entendimento sobre o sistema oceano. Evidências deste progresso são os novos programas que utilizam a tecnologia espacial para aplicações em oceanografia.

Atualmente, quase todos os ramos da Oceanografia consideram o Sensoriamento Remoto como uma ferramenta de grande utilidade na aquisição de dados de interesse. O desafio àqueles que desenvolvem pesquisas em Sensoriamento Remoto, mais especificamente na área de Oceanografia, é o de explorar teorias e conceitos e desenvolver aplicações que não se concretizariam somente com a utilização de métodos convencionais. Neste contexto geral, são incluídos os estudos de processos oceanográficos que requerem uma resolução espacial sinóptica e uma capacidade de amostragem por longo período, características estas possíveis de serem obtidas com o emprego de satélites.

As áreas mais promissoras são as que utilizam dados coletados convencionalmente - por bóias e navios, e por observações orbitais de forma complementar, afim de se revelar uma perspectiva mais ampla para o estudo e entendimento de processos e fenômenos oceanográficos.

Se desejamos acompanhar esta evolução, não devemos esquecer os princípios básicos envolvidos na aquisição de dados por Sensoriamento Remoto, bem como não podemos deixar de conhecer os sistemas e os sensores em disponibilidade e suas técnicas de utilização, para nos beneficiarmos da melhor forma possível, de mais esta conquista do Homem na procura da compreensão do meio em que vive.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Biggs, D.C.; Müller-Karger, F.E. Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 99:7371-7384. 1994

Clark, D.K. Phytoplankton pigment algorithm for the NIMBUS-7 CZCS. In: Gower, J.R.F., Ed., *Oceanography from Space*, New York, Plenum Press, 227-237. 1981

Clarke, G.L.; Ewing, G.C.; Lorenzen, C.J. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. *Science*, 167:1119-1121. 1970

Gordon, H.R.; McCluney, W.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Appl. Optics*, 140:413-416. 1975

Gregg, W.W.; Carder, K.L. A simple spectral solar irradiance model for cloudless - maritime atmospheres. *Limnol. Oceanogr.*, 35(8):1657-1675. 1990

Hooker, S.B.; McClain, C.R. The calibration and validation of SeaWiFS data. *Progress in Oceanography*, 45:427-465. 2000

Laurs, R.M.; Brucks, J.T. Living marine resources applications. In: *Advances in Geophysics*, V.27, Saltzman, B., Ed., Academic Press, New York, 419-452pp. 1985

McClain, C.; Esaias, W.E.; Barnes, W.; Guenther, B.; Endres, D.; Hooker, S.B.; Mitchell, B.G.; Barnes, R. SeaWiFS calibration and validation Plan: In: Hooker, S.B.; Firestone, E.R., eds., *SeaWiFS Technical Report Series*, V.3 (NASA Technical Memorandum 104566). NASA, Washington, DC, 43p. 1992.

- Monger, B.; McClain, C.; Murtuguude, R. Seasonal phytoplankton dynamics in the eastern tropical Atlantic. *J. Geoph. Res.*, 102:12389-12411. 1997
- Peláez, J.; McGowan, J.A. Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. *Limnol. Oceanogr.*, 31(5):927-950. 1986
- Robinson, I.S. *Satellite oceanography: an introduction for oceanographers and remote sensing scientists*. West Sussex, England, Ellis Horwood, 1985. 455p.
- Santamaria-del-Angel, E.; Alvarez-Borrego, S.; Müller-Karger, F.E. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geoph. Res.*, 99:7411-7422. 1994
- Sathyendranath, S.; Platt, T. The spectral irradiance field at the surface and in the interior of the Ocean: a model for applications in Oceanography and Remote Sensing. *J. Geoph. Res.*, 93:9270-9280. 1988
- Smith, R.C.; Baker, K.S. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *Limnol. Oceanogr.*, 23(2):247-259. 1978
- Yentsch, C.S. The influence of phytoplankton pigments on the color of seawater. *Deep-Sea Res.*, 7:1-17. 1959