

ON THE USE OF VISIBLE AND INFRARED SATELLITE IMAGERY FOR COASTAL DYNAMICAL STUDIES

Carlos Alberto Eiras Garcia
Departamento de Física
Fundação Universidade de Rio Grande
Rua Alfredo Huch ,475 Caixa Postal 474
CEP 96200 Rio Grande RS Brasil

RESUMO

Sensores que coletam radiação na faixa do visível e infravermelho, a bordo de satélites em órbitas polares, oferecem uma visão sinóptica de regiões oceânicas. Oceanógrafos podem tirar vantagens da enorme quantidade de dados presente nas imagens para extrair informações sobre a circulação e processos de dispersão em áreas costeiras. Os requisitos para um procedimento automático de extração de velocidades envolvem várias etapas de pré-processamento, incluindo correções atmosféricas e geométricas das imagens.

Este artigo pretende rever o estado da arte na computação de fluxos de água do mar a partir de imagens sequenciais, com ênfase no Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) e o Coastal Zone Colour Scanner (CZCS). Este trabalho será ilustrado com exemplos, incluindo circulação em mares rasos, e uma comparação entre vetores computados por satélites e derivados por modelos numéricos.

ABSTRACT

Visible and infrared spectral sensors on a polar-orbiting satellite provide a synoptic view of ocean regions. Oceanographers can take advantage of the vast quantity of data involved in these images to extract valuable information about circulation and dispersal processes in coastal areas. Requirements for such an automated extraction procedure would involve several preprocessing tasks, including atmospheric correction and geometric rectification of the images.

This article attempts to make an assessment of the current state of art of computing sea surface flows from sequential images, with emphasis on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) and the Coastal Zone Colour Scanner (CZCS) data. This review will be illustrated by examples, including circulation in shallow seas, and a comparison between satellite-computed and model-derived currents.

1. INTRODUÇÃO

Uma das maiores contribuições à oceanografia descritiva nas últimas décadas tem sido a constante obtenção de dados sinópticos por satélites na faixa da radiação visível e infravermelha. A identificação de fenômenos de escalas meso (100 km) e macro (1000 Km) oceânicas, facilmente detectáveis pela atual configuração dos sensores, pode levar o oceanógrafo a compreender rapidamente os processos físicos relevantes presentes nas imagens. Estas análises podem reforçar teorias, previamente estabelecidas, ou determinar bases para novos estudos a serem executados *in situ* por expedições oceanográficas, na tentativa de compreender os mecanismos que originaram a distribuição espacial da radiação refletida ou emitida pelo oceano.

Um dos requisitos básicos para o oceanógrafo é o conhecimento da física e das limitações de dados de satélite nas faixas do visível e infravermelho. Devido às altitudes dos satélites, os sensores recebem radiação proveniente do oceano e também da atmosfera; assim sendo a separação entre os dois sinais torna-se necessária para a análise quantitativa dos dados de origem oceânica. Após as correções atmosféricas, o oceanógrafo está em condições de analisar as imagens em diversas escalas temporais. Dependendo do satélite e do interesse do pesquisador, as análises podem adquirir um caráter sazonal (baixa frequência), mensal, semanal, ou diária (alta frequência).

Este artigo tenta fazer uma revisão dos requisitos básicos e do estado da arte na obtenção de correntes superficiais a partir da análise sequencial (alta frequência) de imagens provenientes de satélites de órbitas

polares. Mais especificamente, neste trabalho utilizaremos dados do *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS), a bordo do *Nimbus-7*, e do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), da série NOAA.

2. CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS E GEOMÉTRICAS

2.1 Correção Atmosférica

A atmosfera contribui com uma significativa porção da radiação espectral recebida pelos sensores dos satélites. Como estamos interessados na radiação emitida ou espalhada pela água do mar, esta correção é extremamente complexa. Um dos motivos é a dificuldade de se obter informações sobre as concentrações dos diferentes constituintes da atmosfera, e estabelecer modelos que simulem os mecanismos de interação entre os mesmos e a radiação eletromagnética. No caso da radiação visível, e mais precisamente o do sensor CZCS, Gordon et al (1983) sugeriu que a radiancia refletida pela água do mar e coletada nos canais 1 (433-453 nm), 2 (510-530 nm) e 3 (540-560 nm) poderia ser calculada, assumindo que a radiancia refletida no canal 4 (660-680 nm) é nula (ou detectável, se conhecida a concentração de clorofila local). Isto possibilitaria o cálculo da radiancia espalhada pela atmosfera, utilizando as teorias do espalhamento molecular (Rayleigh) e devido aos aerossóis (Mie), e finalmente o sinal emergente do mar.

No caso da radiação infravermelha, algoritmos podem ser desenvolvidos para a calibração da temperatura superficial da água do mar (TSM). Após calibração radiométrica (Lauritson et al, 1979), estimativas da TSM podem ser feitas a partir de algoritmos que a correlacionam com a temperatura de brilho dos canais 4 (10.3-11.3 μm) e 5 (11.5-12.5 μm). Estes

algoritmos são locais e dependem do ângulo de visão do sensor (Llewelling-Jones et al, 1984). No caso de estudos dinâmicos, a temperatura de brilho pode substituir a TSM sem maiores prejuízos, uma vez que estamos interessados na distribuição espacial de feições térmicas e não nos valores absolutos da TSM.

2.2 Correção Geométrica

As imagens devem ser corrigidas geometricamente e projetadas num mapa padrão. Modelos orbitais dos satélites são utilizados para a primeira correção. Se distorções persistirem quando da comparação entre imagens sequenciais, as mesmas podem ser minimizadas através da aplicação de uma transformada polinomial. A minimização destas distorções é importantíssima, visto que o campo de velocidades é diretamente dependente da precisão das correções geométricas.

3. MÉTODOS DE OBTENÇÃO DE VELOCIDADES SUPERFICIAIS DO MAR (VSM)

Até recentemente, uma das formas de obter um campo de velocidades superficiais em águas oceânicas era através do lançamento de bóias de deriva ou uso de correntógrafos. Estes meios são extremamente caros, e provavelmente não os mais adequados, pois a densidade espacial de dados será restrita ao número de instrumentos disponíveis. Com o advento do Acoustic Doppler Current Profile (ADCP), a obtenção das VSM em áreas costeiras parece ser uma solução plausível (Barrick et al, 1977; Prandle and Ryder, 1985), embora o campo de velocidade esteja restrito à largura e à convergência dos feixes do radar. Imagens de satélite, por outro lado, oferecem dados verdadeiramente sinópticos e com alta densidade espacial, propiciando

as chances maiores de verificar a circulação em zonas costeiras a partir da análise quantitativa da radiação visível e infra-vermelha recebidas pelos sensores.

3.1. O Método de seguir feições.

As velocidades superficiais podem ser estimadas a partir da localização de determinadas feições térmicas (frentes, por exemplo) numa sequência de imagens NOAA. Por exemplo, Legeckis (1975) determinou a velocidade de deriva dos ciclones no lado continental da Corrente do Golfo e Tanaka et al (1982) estimou a ordem de grandeza das velocidades da Corrente de Kuroshio. La Violette (1984), após correções atmosféricas e geométricas das imagens do AVHRR/NOAA-7, descreveu em detalhes o giro existente no Mar do Alboran e estimou as velocidades de determinadas feições usando 24 imagens. Vastano and Borders (1984), através da mesma técnica, analisaram a advecção de feições de escala meso oceânicas no Pacífico Norte, enquanto que Flament et al (1985) estudou a evolução de filamentos de ressurgência na região costeira da Califórnia. Svejkovsky (1988) apresentou uma análise da precisão deste método, através de dados obtidos *in situ* com paraquedas de deriva, e concluiu que: (a) a precisão é afetada pela habilidade do analista, (b) existe uma concordância nas velocidades da faixa de 15 a 40 cm/s, e (c) que um intervalo de 12 a 24 horas entre as imagens sucessivas resulta em melhores resultados do que intervalos menores.

Para o cálculo das velocidades deve ser assumido que os deslocamentos horizontais das feições térmicas (ou de cor) indicam o fluxo de água na área considerada. Entretanto, o método apresenta algumas falhas. Por exemplo, (1) em áreas de alta turbulência as

feições perdem suas identidades rapidamente, tornando quase impossível segui-las nas imagens subsequentes; (2) a escolha das feições é bastante subjetiva; (3) embora zonas frontais sejam preferidas pelo analista, instabilidades devido ao intenso cisalhamento entre as distintas massas de água tendem a destruí-las; e (4) as feições que apresentam pequenos gradientes não podem ser seguidas.

3.3. O método da Máxima Correlação Cruzada (MCC)

Na década de 1960, a habilidade de se determinar o movimento das nuvens a partir das imagens dos satélites geo-estacionários estava baseada na produção de séries temporais (Fujita, 1969). O desenvolvimento de uma técnica automática capaz de processar a vasta quantidade de informações sinópticas era altamente desejável. Coube a Leese et al (1971) introduzir um método para computar deslocamentos horizontais de nuvens utilizando a correlação cruzada entre as radiancias refletidas pelas mesmas. Este método foi empregado posteriormente na oceanografia para detectar movimentos de blocos de gelo no Mar de Beaufort por Ninnis et al (1986), utilizando dados do canal visível do AVHRR. Emery et al (1986) aplicaram o método em séries sequenciais do canal do infra vermelho do AVHRR nas águas costeiras da British Columbia, Canadá, com relativo sucesso. Garcia and Robinson (1989) utilizaram o método para a obtenção de correntes residuais, a partir da radiação visível refletida pelas águas do Canal da Mancha e Mar do Norte, e coletada pelo sensor CZCS.

A técnica MCC consiste, essencialmente, em localizar a correlação cruzada máxima bidimensional entre uma janela da primeira imagem e outra da

segunda imagem. No ponto de correlação máxima, determina-se o deslocamento total, que dividido pelo intervalo de tempo entre as imagens, resulta na velocidade. Para maiores detalhes, veja Garcia (1989a).

3.4. Comparações Entre os Dois Métodos

Algumas diferenças existem entre os métodos, embora essencialmente ambos medem o deslocamento médio de padrões em imagens, sobre um período de tempo. As diferenças principais são:

(1) O *de seguir feicoes* depende do analista, enquanto que o MCC é independente;

(2) O MCC é mais rápido (com a utilização de transformadas de Fourier - FFTs) enquanto que o segundo depende da habilidade e treinamento do operador;

(3) O MCC, na sua forma mais simples, calcula apenas movimento de translação dos padrões de imagem. Se o intervalo de tempo entre as imagens for suficientemente pequeno, então a rotação pode ser subdividida em segmentos de translação;

(4) O MCC fornece um campo de velocidades mais coerente e sinóptico, devido ao fato de poder detectar o deslocamento de feições de estrutura espacial fraca, enquanto que o analista não pode visualizá-los.

Além dos comentários acima, vale ressaltar que ambos os métodos são incapazes de discriminar fenômenos não advectivos. Se a informação contida no canal infravermelho é utilizada, uma diferença local detectada na temperatura da água pode ser devida à advecção horizontal e vertical, ao aquecimento ou esfriamento, e à intensa mistura das massas d'água. Consequentemente, somente a advecção horizontal é calculada ou computada pelos métodos. De qualquer forma, é bem provável que a advecção

horizontal e o aquecimento (ou resfriamento) sejam os maiores responsáveis pelas mudanças verificadas na distribuição de temperatura sobre um período menor do que 24 horas. Assim sendo, a parte referente a fontes ou sumidouros de radiação na faixa do infravermelho irão contribuir com erros que não podem ser facilmente corrigidos.

4. A RELAÇÃO ENTRE AS FEIÇÕES NAS IMAGENS E A INFORMAÇÃO DINÂMICA

Os níveis de cinza das imagens, neste caso, podem ser interpretados como um traçador particular na superfície do mar. No caso da radiação da luz visível, há normalmente uma relação direta entre a radiancia refletida pelo mar e a quantidade de material em suspensão presente na camada superficial, principalmente em mares rasos com correntes fortes que possam induzir a ressuspensão de sedimentos. Se a área em questão apresenta uma produtividade primária alta, a cor do oceano deve ser interpretada com precauções. No oceano aberto, a biomassa fitoplanctônica, presente na camada eufótica, influencia fortemente a radiação espectral refletida pelo mar, devido à presença do pigmento clorofila. A distribuição da luz e a disponibilidade de nutrientes, além de outros mecanismos, desempenham um papel significativo no crescimento, e na distribuição temporal e espacial desses organismos. Até que ponto estas influências causarão uma significativa mudança num determinado patch de fitoplâncton sobre um período de 24 horas não é inteiramente compreendido. Desta forma, a migração vertical da população passa a ser um fator relevante.

No caso da radiação emitida pela água do mar na faixa do infravermelho, os níveis de cinza estarão relacionados com a temperatura da superfície da água do

mar. Este traçador pode apresentar variações diurnas, principalmente em águas costeiras, que influenciariam a computação das velocidades superficiais. Desta forma, os constituintes não biológicos que conferem a cor ao oceano são mais conservativos do que a temperatura, e não são influenciados por ciclos diários, oferecendo assim maiores possibilidades para se calcular o campo de velocidades na área em questão.

O campo de velocidades obtido através da análise sequencial de imagens de satélites deve ser interpretado com a advecção horizontal das feições das imagens. No caso da radiação visível, a informação da massa oceânica em movimento é restrita à profundidade com que o espalhamento reverso ocorre, ou seja, nos primeiros metros da superfície. Processos difusivos, fontes e sumidouros, embora existentes, são considerados desprezíveis no transporte do traçador nesta escala temporal (intervalo entre as imagens).

5. VELOCIDADES SUPERFICIAIS EM MARES RASOS

O método da MCC tem sido aplicado a vários pares de imagens dos sensores CZCS e AVHRR da região da plataforma continental do Noroeste Europeu, com resultados positivos (Garcia and Robinson, 1989; Garcia, 1989b). A região é caracterizada por fortes correntes de mares (com predominância da M_2), o que provoca a ressuspensão dos sedimentos. Devido ao fato de que o intervalo de tempo entre duas imagens sucessivas do CZCS é aproximadamente 24.3 horas, as velocidades computadas representarão a corrente residual (circulação) em áreas onde o sinal devido à maré, dentro do déficit de 1/2 hora para completar 2 ciclos da M_2 , é insignificante. Isto possibilita o estudo da circulação local (fig 1). Aperfeiçoamentos podem ser

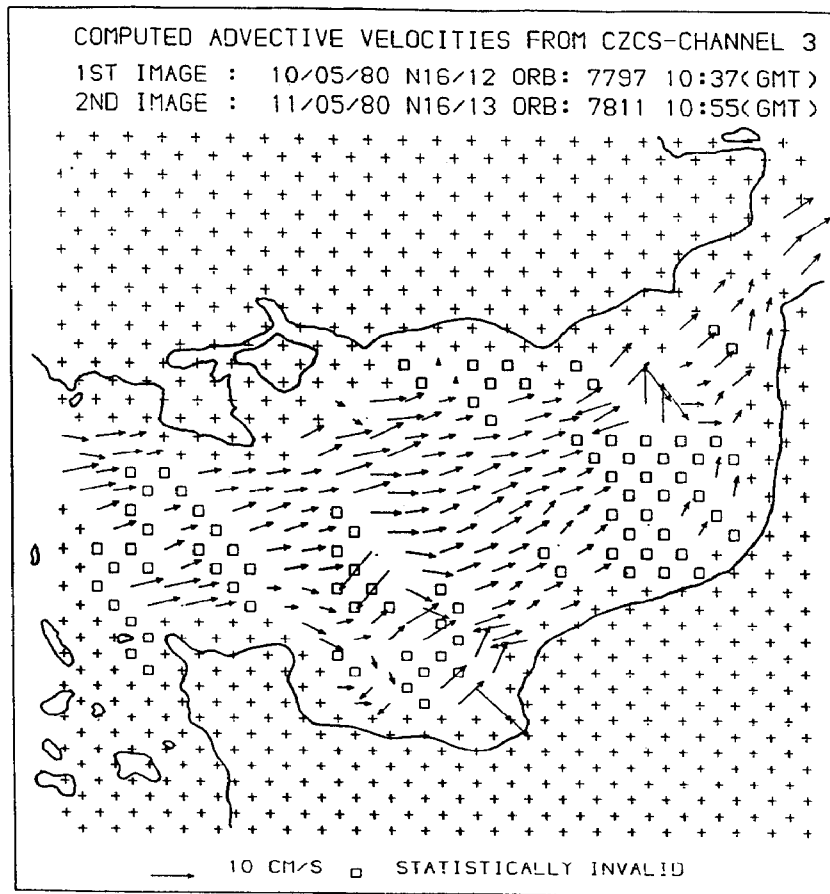


Fig 1. O campo de velocidades obtido pelo método MCC, utilizando-se duas imagens do CZCS (intervalo de 24.3 horas) na região leste do Canal da Mancha. Os níveis de cinza do canal 3 (540-560 nm), após correções atmosféricas e geométricas, foram utilizados como traçador.

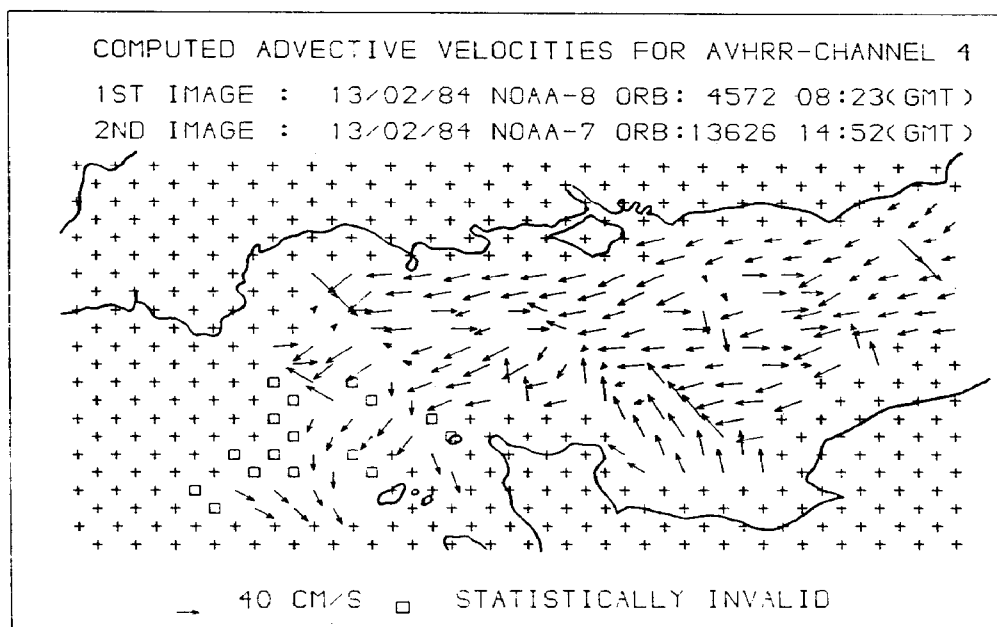


Fig 2. Campo de velocidade obtido a partir de 2 imagens sequenciais do AVHRR, usando o método MCC

feitos no campo de velocidades, extraídos das imagens, se existir um modelo matemático (ou uso de tabuas de mares) capaz de prever o valor da corrente devido às marés nas áreas onde o sinal da maré seja relevante.

A figura 2 mostra as velocidades obtidas quando da aplicação do método MCC a duas imagens do AVHRR (intervalo de 6.5 horas) no Canal da Mancha. Neste caso, a radiação recebida pelo canal 4 (10.3-11.3 μm), após correções atmosféricas e geométricas, foi utilizada como traçador. O fluxo direcionado para oeste é devido às fortes correntes de marés (vazante, durante o período de tempo entre as imagens).

Comparações podem ser feitas entre as correntes computadas pelo método MCC e as derivadas por um modelo hidrodinâmico de maré (fig 3a). A análise das divergências entre os vetores, mostrados nas figuras 3b e 3c, deve ser feita levando em conta vários fatores. Dentre os mesmos, destaca-se o fato de que o modelo é integrado verticalmente, enquanto que os vetores do MCC medem deslocamentos da camada superficial. Outros mecanismos forçantes que não o da maré (vento, componente baroclínico, etc) inexistem no modelo numérico, mas atuam na massa d'água durante o período de tempo entre as imagens.

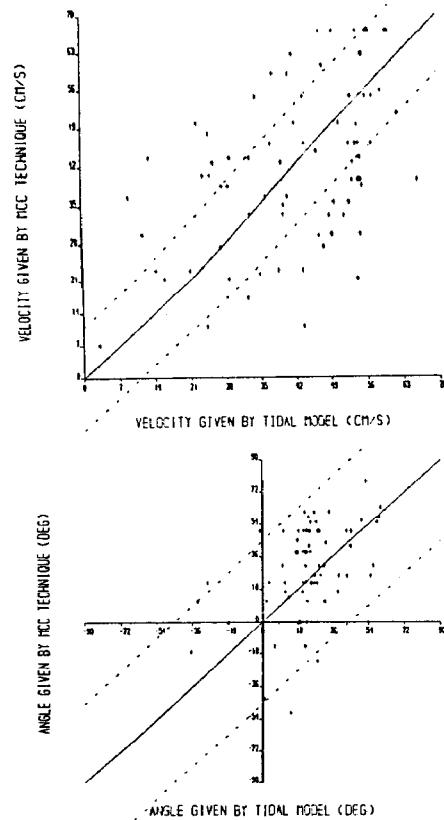
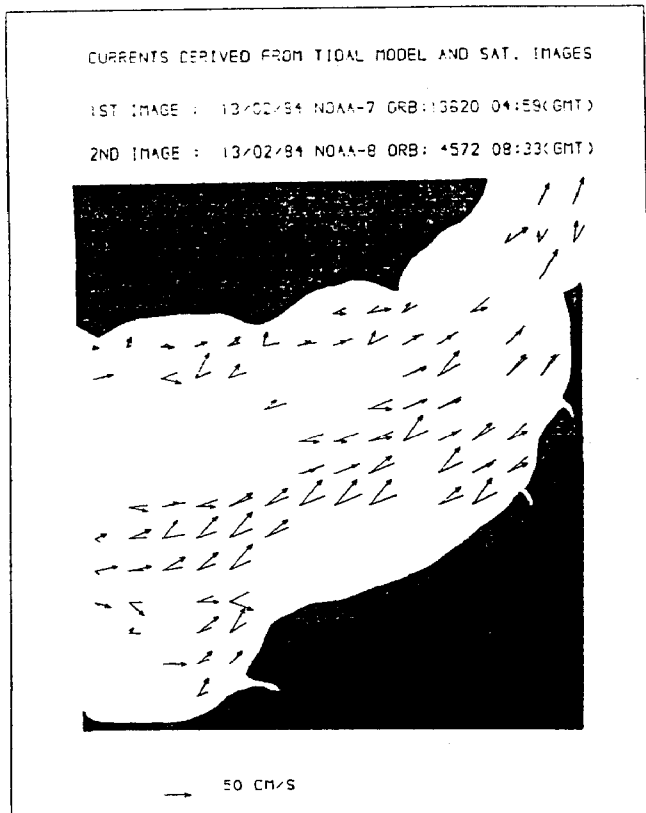


Fig 3. (a) Comparação entre velocidades obtidas pela técnica MCC (setas) e derivadas de um modelo hidrodinâmico de maré (retas). Comparação entre as magnitudes (b) e direções (c) dos vetores mostrados em (a). As linhas pontilhadas representam o erro inerente da técnica MCC devido à imprecisão de 1 pixel no esquema de correção geométrica.

5. CONCLUSÕES

O maior objetivo deste artigo era demonstrar a aplicabilidade de técnicas de sensoriamento remoto à oceanografia física, especificamente para gerar campos de velocidades, representando o transporte de um particular traçador da água do mar. A precisão na medida das velocidades depende das estratégias adotadas para as correções atmosféricas e geométricas das imagens. Dois métodos de obtenção de velocidades foram descritos, sendo o da MCC mais indicado pela sua rapidez e independência do operador.

Os constituintes não biológicos da água do mar, que conferem a cor ao oceano, são traçadores naturais mais indicados para a computação dos deslocamentos das feições.

A interpretação da circulação local é feita após análise do que é conhecido sobre a dinâmica local das marés, sendo crucial nos casos em que as correntes de marés são fortes. Se o intervalo de tempo entre as imagens difere de um múltiplo do ciclo da maré dominante, correções devem ser feitas (tabelas de marés, modelos, etc).

No caso da utilização da radiação infravermelha, e para curtos intervalos de tempo entre as imagens, as velocidades computadas pelo método da MCC recebem outra interpretação. Nos exemplos apresentados neste artigo, as marés influenciam fortemente o fluxo d'água, mas comparações com modelos hidrodinâmicos podem ser feitas com precauções.

6. BIBLIOGRAFIA

BARRICK, D.E.; M.W. EVANS; and R.L WEBER .Ocean surface currents mapped by radar, Science, 198: 138-144, 1977
EMERY, W.J.; A.C. THOMAS; M.J. COLLINS; W.R. CRAWFORD; and D.L. MAKLAS .An

objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images, J. Geophys. Res., 91: 12865-12878, 1986

FLAMENT, P.; L. ARMI; and L. WASHBURN . The evolving structure of an upwelling filament, J. Geophys. Res., 90: 11765-11778, 1985

FUJITA, T. Present status of cloud velocity computation from ATS-I and ATS-III satellites, in Space Research IX, Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 557-570, 1969

GARCIA, C.A.E. Extraction of dynamical information in shallow seas from ocean colour imagery, IV Latin American Symposium on Remote Sensing, Bariloche, Argentina, 1989a

GARCIA, C.A.E. Comparisons between currents derived from AVHRR imagery and a tidal model in the eastern English Channel, I SELPER AVHRR CONFERENCE, Bariloche, Argentina, 1989b

GARCIA, C.A.E; and I.S. ROBINSON .Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential Coastal Zone Color Scanner satellite data, J. Geophys. Res., 94: 12681-12691, 1989

GORDON, H.R., D.K. CLARK, J.W. BROWN, O.B. BROWN R.H. EVANS, AND W.W. BROENKOW. Phytoplankton pigment concentrations in the the Middle Atlantic Bight: comparisons of ship determinations and CZCS estimates. Appl. Opt., 22, 20-36, 1983.

LA VIOLETTE, P.E. The advection of submesoscale thermal features in the Alboran Sea gyre, J. Phys. Oceanogr., 14: 450-505, 1984

LAURITSON, L., G.J. NELSON, AND F.W. PORTO. Data extraction and calibration of TIROS-N/NOAA radiometers. NOAA Technical memorandum NESS 107, NOAA, Washington, DC, USA, 1979.

- LEESE, J.A.; C.S. NOVAK; and B.B. CKARKE.
 An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation, J. Appl. Meteorol., 10: 110-132, 1984
- LEGECKIS, R.. Application of synchronous meteorological satellite data to the study of time dependent sea surface temperature along the boundary of the Gulf Stream, Geophys. Res. Letters, 91: 12879 - 12886, 1975
- LLEWELLYN-JONES, D.T.; P.J. MINNETT; R.W. SAUNDERS; and A.M. ZAVODY . Satellite multichannel infrared measurements of sea surface temperature of the N.E. Atlantic Ocean using AVHRR/2, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 110: 613-631, 1984
- NINNIS, R.M.; W.J. EMERY; and M.J. COLLINS . Automated extraction of pack ice motion from Advanced Very High Resolution Radiometer imagery, J. Geophys. Res., 91: 10725-10734, 1986
- PRANDLE, D. and D.K. RYDER . Measurements of surface currents in Liverpool Bay by high frequency radar, Nature, 313: 128-131, 1985
- SVEJKOVSKY, J. Sea surface flow estimation from Advanced Very High Resolution Radiometer and Coastal Zone Color Scanner imagery: a verification study, J. Geophys. Res., 93: 6735-6743, 1988
- TANAKA, S.; T. SUGIMURA; and Y. HATAKEYAMA . Compilation of the Kuroshio Current vector map from NOAA-6/AVHRR data and consideration of oceanic eddies and the short period fluctuations of the Kuroshio, J. Rem. Sens. Soc. Japan, 2: 3, 1982
- VASTANO, A.C. and S.E. BORDERS . Sea surface motion over an anticyclonic eddy on the Oyashio Front, Remote Sens. Environ., 16: 87-90, 1984