

APLICAÇÃO DAS IMAGENS DO SATÉLITE LANDSAT E DADOS OCEANOGRÁFICOS
NA VERIFICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE RESSURGÊNCIA

Keiko Tanaka

Instituto de Pesquisas Espaciais

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

São José dos Campos - SP - Brasil

Emmanuel Gama de Almeida*

Diretoria de Hidrografia e Navegação

Ministério da Marinha

Rio de Janeiro - RJ - Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta uma aplicação de imagens dos Satélites LANDSAT e dados oceanográficos obtidos durante o cruzeiro "Cabo Frio I", para a verificação de um modelo matemático da ressurgência. Com base nesses resultados, discutiram-se as características de um modelo linear para a simulação das correntes induzidas pelo vento, calculadas a partir das condições meteorológicas da mesma época da missão. Concluiu-se que existe correspondência significativa entre as informações obtidas pela simulação, temperatura superficial e correntes superficiais observadas na imagem do LANDSAT. Constatou-se também uma boa aproximação entre a simulação do movimento vertical d'água e as medidas dos dados oceanográficos observados em algumas estações oceanográficas que foram realizadas durante a deriva do navio.

* Assessor do Grupo de Oceanografia do Departamento de Sensoriamento Remoto do Instituto de Pesquisas Espaciais e encarregado do Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação.

ABSTRACT

This paper presents an application of LANDSAT Satellite Imagery and Oceanographic Data obtained during the "Cabo Frio" cruise for verification of an upwelling mathematical model. Based on these results, we discuss the characteristics of a Linear Model which simulates wind induced currents, calculated from meteorological conditions at the time of the mission. It is concluded that there is significant correspondence between the model of simulated horizontal water circulation, sea surface water temperature and surface currents observed on LANDSAT imagery. Close approximation was also observed between the simulation of vertical water movement (upwelling) and the oceanographic measurements taken along a series of points of the prevailing currents.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo fazer uma análise dos parâmetros oceanográficos obtidos durante o cruzeiro oceanográfico Cabo Frio I e, baseado nos resultados dos estudos realizados, discutir as características de um modelo matemático linear para a simulação de correntes induzidas pelo vento, calculadas a partir das condições meteorológicas reinantes durante o citado cruzeiro.

O uso das imagens do satélite LANDSAT e de dados oceanográficos é de grande utilidade, para a verificação do modelo matemático de ressurgência, na região de estudo.

A vantagem da utilização das imagens do satélite LANDSAT é que permitem deduzir sinóticamente padrões de circulação das correntes sobre grandes áreas, a partir da interpretação da distribuição dos sedimentos em suspensão, que representam um traçador natural das tendências dessas correntes.

O presente estudo destaca comparações dos resultados obtidos, pelo modelo, e dados oceanográficos com imagens do satélite LANDSAT, o que representa em síntese o procedimento deste trabalho.

2. ANTECEDENTES E PROCEDIMENTO

Tanaka (1977) e Rodrigues (1977) descreveram detalhadamente os materiais e equipamentos usados na obtenção dos dados oceanográficos, meteorológicos e de sensoriamento remoto, obtidos durante o cruzeiro oceanográfico Cabo Frio I, realizado pelo Noc. "Almirante Saldanha" no período de 22 de novembro a 10 de dezembro de 1975, Figura 1.

Rodrigues (1977) concluiu que, durante a fase de deriva do cruzeiro oceanográfico, com o seguimento de um flutuante, confirmou-se a presença de um centro de baixa temperatura, aproximadamente a 12mn (milhas náuticas) a W do farol de Cabo Frio. Esse centro representou o ponto em que a água ressurgida afastou-se com maior componente em relação à costa sendo, na realidade, uma extensão de água fria que penetra pelo fundo passando aproximadamente a 10 mn ao sul do Farol de Cabo Frio.

Os resultados obtidos pelo mesmo autor, sugerem que o mecanismo físico principal da ressurgência é representado pela água fria que se aproxima pelo fundo, atingindo a costa a W de Cabo Frio e dali se afasta na superfície, já bastante misturada, no rumo WSW.

Por sua vez, Tanaka (1977) descreveu este mecanismo através de um modelo matemático linear para simular as correntes induzidas pelo vento na mesma região de estudo, concluindo que a carta numerica dos movimentos verticais, obtidos pela simulação, indica a existência de áreas contínuas de ressurgência junto da costa, e de forma celular na parte central sul da costa, entre Cabo Frio e Baía de Guanabara, orientadas para SW, e que a comparação das intensidades dos movimentos verticais simulados, com as estimativas citadas na literatura, é boa.

Com o propósito de verificar a hipótese de que os movimentos verticais do mar, causados pelo campo de correntes horizontais, se apresentam através de células que se distribuem ao longo da área de estudo, foram determinados os valores das correntes verticais a diferentes profundidades, nos pontos onde foram realizadas as estações da trajetória do flutuador, cujos resultados são mostrados na Figura 3.

A viabilidade e metodologia da aplicação de imagens orbitais ao estudo de processos lagunares e costeiros, usando sedimento em suspensão como traçador natural para tendências da circulação das águas de superfície, tem sido verificadas com sucesso por Herz (1977) em in

interpretações de imagens multiespectrais do LANDSAT e SKYLAB.

No estudo das tendências das correntes da região foram escolhidas duas passagens do satélite LANDSAT: uma obtida do dia 08 de dezembro de 1975, durante a realização do cruzeiro oceanográfico "Cabo Frio I" e outra obtida no dia 03 de setembro de 1976, com as características semelhantes às da primeira (o vento apresentou a mesma direção dominante na época da missão oceanográfica). A imagem de 1975 apresentou 50% de cobertura de nuvens e, a de 1976, 5%. A primeira i magem foi escolhida porque coincidiu com o período de coleta de apoio terrestre e, a segunda, porque discriminava melhor as tendências da circulação costeira usando os sedimentos em suspensão nas águas como traçadores.

Na discussão das tendências de circulação, serão enfat zadas interpretações de imagens obtidas no canal multiespectral MSS 4, (Figura 2), sendo que os padrões de dispersão dos sedimentos em sus pensão apresentam melhor contraste neste canal, apesar do efeito de espalhamento pela atmosfera (sempre presente).

Na interpretação visual, os tons de cinza mais claros ou mais escuros, foram identificados e conseqüentemente foi inferida uma tendência direcional das correntes superficiais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do modelo numérico de Tanaka (1977) indi cam que os movimentos verticais do mar, causados pelo campo das cor rentes horizontais, apresentam-se através de células que se distribuem ao longo da área de estudos, indicando zonas de ressurgência e subsi dência das águas.

Estes resultados indicam que é esperado observar-se, ao longo de uma série de estações oceanográficas, oscilações da estrutu

W 42 30

W 42 00

W 41 30

S 43 00

S 22 30

S 23 00

S 23 00

S 23 30

W 41 30

W 43 00

W 42 30

W 42 00

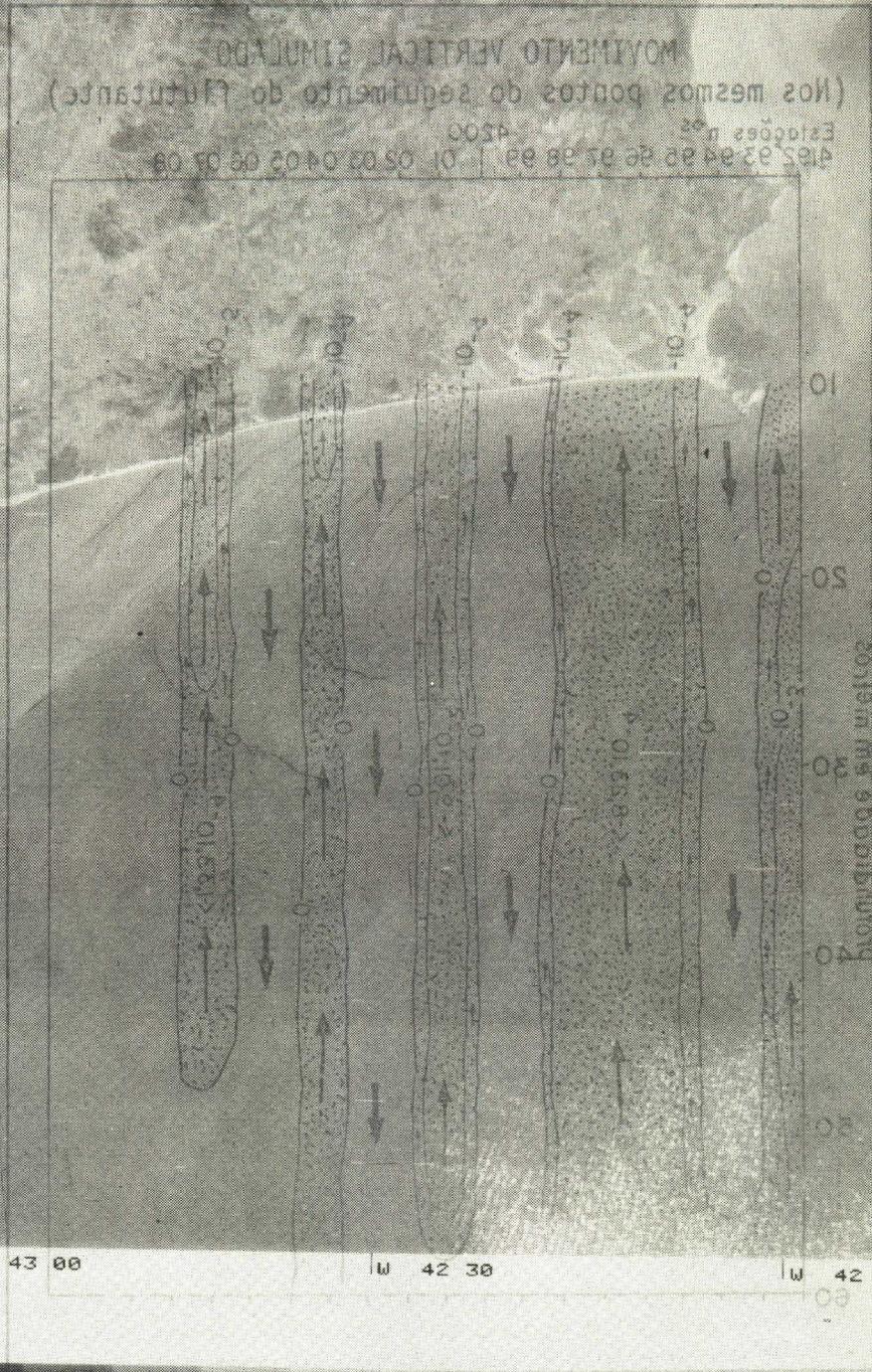


Fig. 2 - Movimento Vertical Simulado em m/s

3SET76 ORB 122 PT 28 C: S23-05/W042-17 MSS 4 SOL: EL31 AZ064 B 190 LC 20955 INPE/LANDSAT 176247-112449-4
 N: S23-04/W042-17 R01 N =BRASIL= 22JAN77 CENA 012

Fig. 2 - Imagens do satélite LANDSAT, escala de 1:1.000.000, passagem de 03/09/1976 do canal MSS-4.

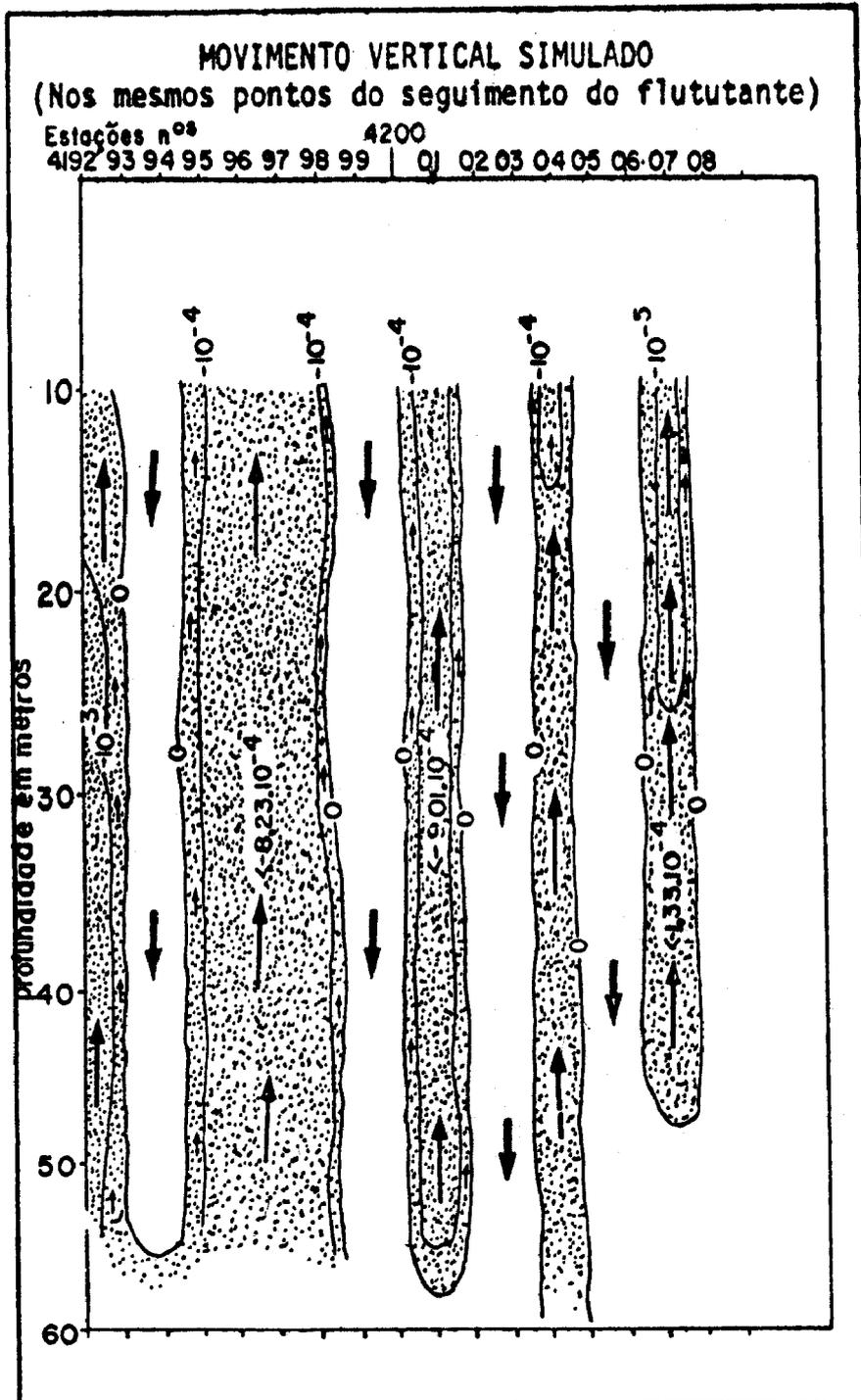


Fig. 3 - Movimento Vertical Simulado em m/s

ra das massas d'água que seriam sua resposta a esses complexos movimentos ascendentes e descendentes, causados pelo campo das correntes horizontais.

A fim de verificar esta hipótese, foram determinados os valores das correntes verticais, a diferentes profundidades, nos pontos onde foram realizadas as estações da trajetória do flutuador.

Os resultados estão mostrados na Figura 3, que indicam o comportamento teórico do oceano ao longo dessa trajetória, quanto à distribuição dos seus movimentos verticais. Pode ser observado que as zonas de movimentos verticais ascendentes estão localizadas nas estações n.ºs. 4192, 4193, 4195 a 4198, 4201, 4204 e 4207. Além disso, pode-se observar que estas velocidades verticais diminuem à medida que nos deslocamos da estação 4192 (próximo à ilha de Cabo Frio) para a estação 4208 (a SW de Cabo Frio distanciando-se da costa).

Estes resultados se ajustam de modo bastante razoável, com as pulsações observadas por Rodrigues (1977), ao longo da trajetória do flutuador, através da invasão de águas mais frias, nas estações 4198, 4202, 4204 e 4207, conforme mostra a Figura 4.

O modelo parece sugerir que existem regiões do oceano, junto à costa, que funcionam alternadamente como campos de correntes ascendentes e descendentes de água, criando, como consequência, trajetórias mais propícias para a penetração da água de ressurgência, que invade a plataforma continental e se desloca com maior facilidade para zonas mais rasas próximo ao continente e, de modo inverso, permitindo o escoamento de água das zonas mais rasas para o oceano.

Esta hipótese parece também encontrar apoio na diferença de temperatura da água do mar e a temperatura do ar, encontrada por Rodrigues (1977) e interpretada como ocorrência de forte movimento advectivo, que traz águas mais frias do fundo para a superfície, nas regiões das estações 4198 e 4199.

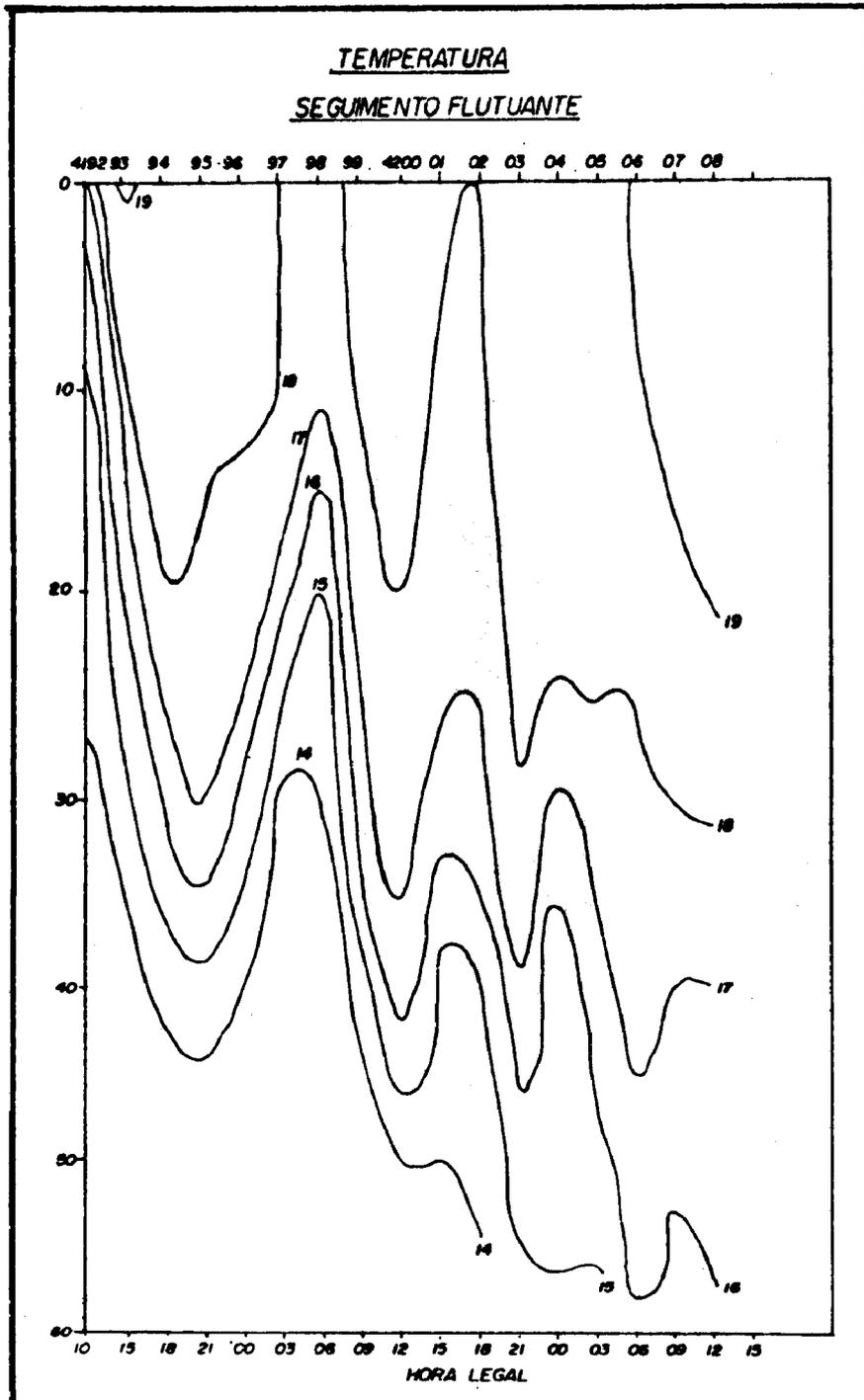


Fig. 4 - Distribuição Vertical de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) durante o seguimento do Flutuante (Rodrigues, 1977)

As imagens obtidas do satélite LANDSAT, pela existência de sedimentos na água da região do estudo, possibilitaram a detecção das tendências das direções das correntes no oceano.

A Figura 5, mostra a interpretação visual da imagem, obtida no dia 03 de setembro de 1976 e traduzem a distribuição qualitativa das tendências das correntes de superfície. Embora obtida em outra época, está sob o efeito de um vento semelhante ao observado na imagem do dia 08 de dezembro de 1975, obtida durante a realização do cruzeiro oceanográfico. Observa-se na figura que o vento dominante é de NNE.

As imagens, e os dados oceanográficos simultâneos, representam um valioso elemento para a interpretação e ajuste dos modelos numéricos de simulação das correntes produzidas pelo vento, na área de estudo. A Tabela 1, indica que, na ocasião, havia ressurgência na área.

A Figura 6(A), segundo Tanaka (1977), representam o campo das velocidades horizontais das correntes costeiras, produzidas por um vento de direção 070° e intensidade 18 nós, na superfície do mar. Por sua vez a Figura 6 (B), representa o campo das velocidades a 90 m de profundidade. Tais condições representam aquelas observadas durante o cruzeiro oceanográfico Cabo Frio I.

As Figuras 7 (A) e (B), segundo Rodrigues (1977), representam, respectivamente, distribuição típica da temperatura, na superfície e no fundo, em condições de ressurgência, sendo que o eixo de maior curvatura (Figura 7 (A)), indica a direção esperada que deve tomar um observador solidário à massa d'água superficial.

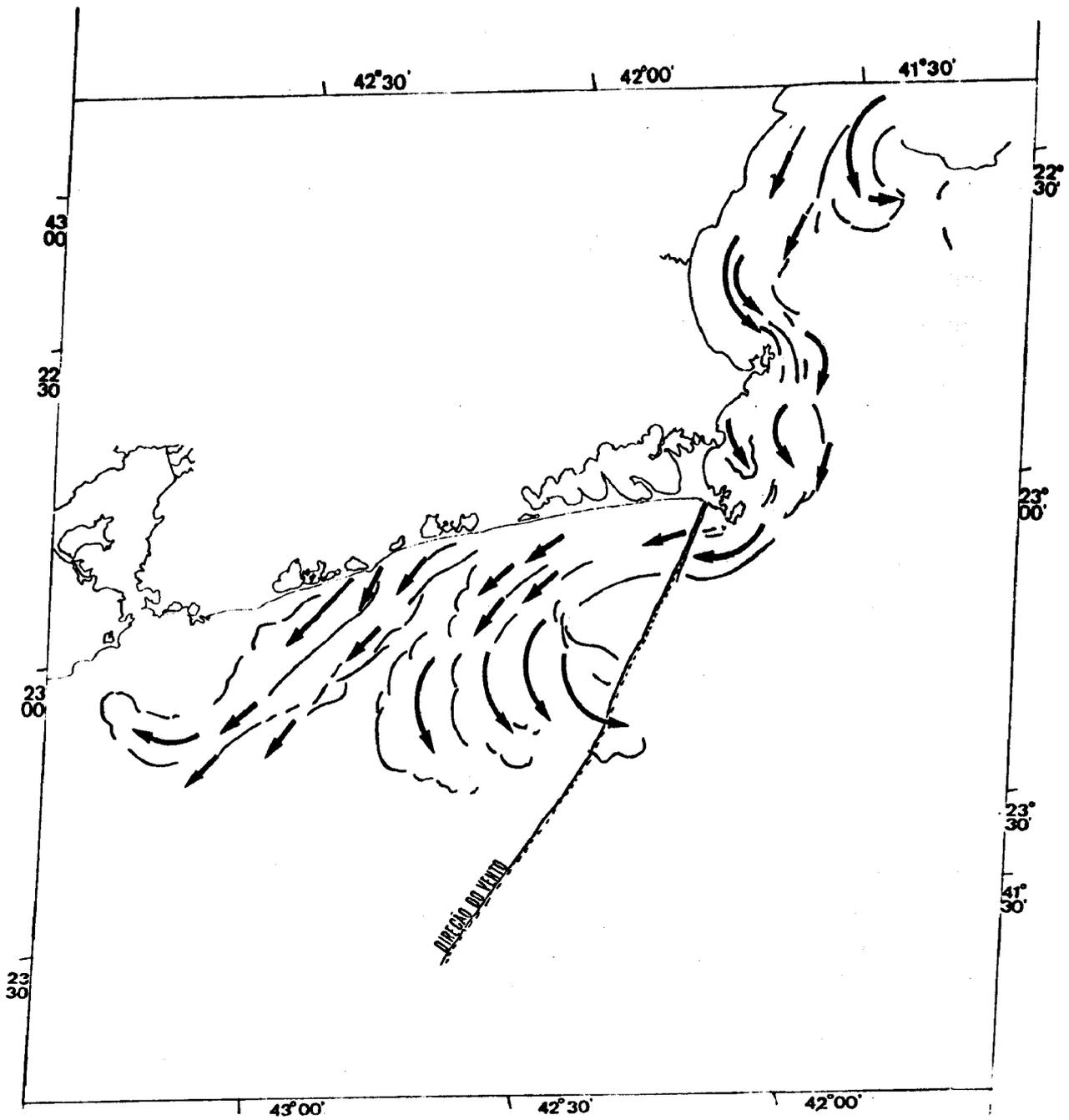


Fig. 5 - Interpretação Visual da Imagem do Satélite LANDSAT, obtida no dia 03 de setembro de 1976, escala 1:1.000.000, canal MSS-4

TABELA 1

DIREÇÃO E INTENSIDADE DOS VENTOS, TEMPERATURA SUPERFICIAL, ÁGUA DO MAR, EM °C, FORNECIDO PELA COMPANHIA NACIONAL DE ALCALIS

HORA	DATA	DIREÇÃO	GRAUS	VELOC. (NOS)	TEMP. ÁGUA DO MAR
0	1/9/76	NNE	22.5	6.0	20.5
1	1/9/76	NNE	22.5	7.0	20.5
2	1/9/76	NNE	22.5	4.0	20.5
3	1/9/76	NNE	22.5	4.0	20.5
4	1/9/76	NNE	22.5	4.0	20.5
5	1/9/76	N	.0	5.0	20.5
6	1/9/76	N	.0	3.0	20.5
7	1/9/76	N	.0	5.0	20.5
8	1/9/76	NNE	22.5	7.0	20.5
9	1/9/76	NNE	22.5	7.0	20.5
10	1/9/76	NNE	22.5	8.0	20.5
11	1/9/76	NNE	22.5	7.0	21.0
12	1/9/76	NE	45.0	7.0	21.0
13	1/9/76	NE	45.0	8.0	21.0
14	1/9/76	NE	45.0	8.0	21.0
15	1/9/76	NE	45.0	8.0	21.0
16	1/9/76	NE	45.0	8.0	21.0
17	1/9/76	NNE	22.5	9.0	21.0
18	1/9/76	NNE	22.5	10.0	21.0
19	1/9/76	NNE	22.5	10.0	20.5
20	1/9/76	NNE	22.5	8.0	20.5
21	1/9/76	NNE	22.5	10.0	20.5
22	1/9/76	NNE	22.5	8.0	20.5
23	1/9/76	NNE	22.5	7.0	20.5
0	2/9/76	NNE	22.5	6.0	20.5
1	2/9/76	NNE	22.5	7.0	19.5
2	2/9/76	NNE	22.5	7.0	19.5
3	2/9/76	NNE	22.5	7.0	19.5
4	2/9/76	NNE	22.5	7.0	19.5
5	2/9/76	NNE	22.5	7.0	19.5
6	2/9/76	NNE	22.5	8.0	19.0
7	2/9/76	NNE	22.5	9.0	19.0
8	2/9/76	NNE	22.5	10.0	19.0
9	2/9/76	NNE	22.5	10.0	19.0
10	2/9/76	NNE	22.5	10.0	17.5
11	2/9/76	NE	45.0	10.0	17.5
12	2/9/76	NE	45.0	10.0	17.5
13	2/9/76	NE	45.0	11.0	17.5
14	2/9/76	NE	45.0	12.0	18.0
15	2/9/76	NE	45.0	12.0	16.0
16	2/9/76	NE	45.0	12.0	17.5
17	2/9/76	N	.0	12.0	17.5
18	2/9/76	N	.0	12.0	17.5
19	2/9/76	N	.0	10.0	16.5
20	2/9/76	N	.0	10.0	16.5
21	2/9/76	N	.0	10.0	16.5
22	2/9/76	N	.0	8.0	16.5
23	2/9/76	N	.0	8.0	16.5
0	3/9/76	N	.0	10.0	16.5
1	3/9/76	N	.0	10.0	16.5
2	3/9/76	N	.0	7.0	16.5
3	3/9/76	N	.0	7.0	16.5
4	3/9/76	N	.0	7.0	16.5
5	3/9/76	N	.0	7.0	16.5
6	3/9/76	N	.0	7.0	16.5
7	3/9/76	N	.0	9.0	16.5
8	3/9/76	N	.0	8.0	16.5
9	3/9/76	N	.0	7.0	16.5
10	3/9/76	NNE	22.5	10.0	16.5
11	3/9/76	NNE	22.5	9.0	17.0
12	3/9/76	NNE	22.5	10.0	17.0
13	3/9/76	NNE	22.5	7.0	17.0
14	3/9/76	NNE	22.5	9.0	17.0
15	3/9/76	NNE	22.5	13.0	17.0
16	3/9/76	NNE	22.5	11.0	17.0
17	3/9/76	NNE	22.5	10.0	17.0
18	3/9/76	NNE	22.5	10.0	17.0
19	3/9/76	N	.0	10.0	17.0
20	3/9/76	N	.0	7.0	16.5
21	3/9/76	N	.0	10.0	16.5
22	3/9/76	N	.0	10.0	16.5
23	3/9/76	N	.0	7.0	16.5

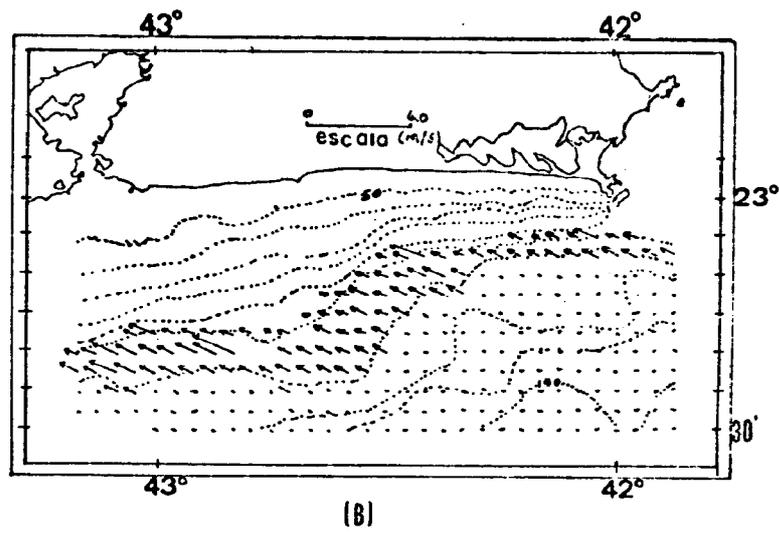
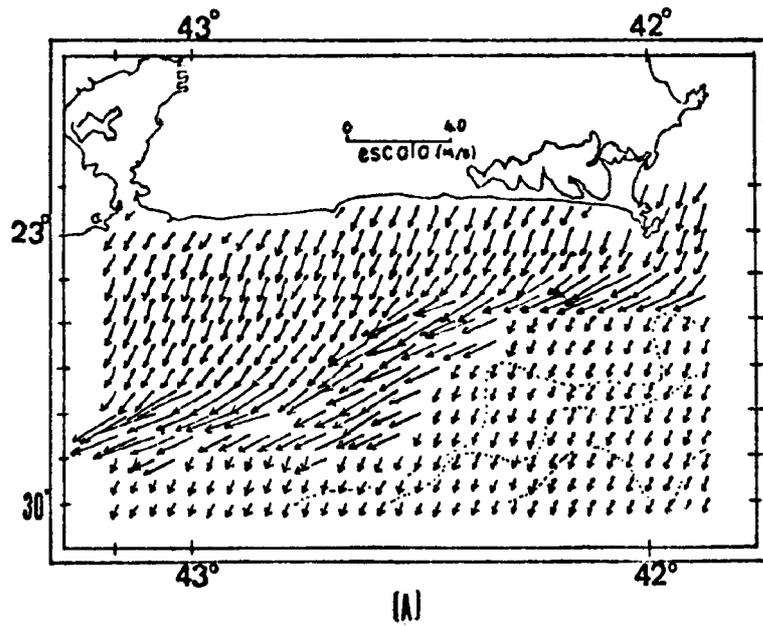


Fig. 6 - (A) e (B) - Campos das Velocidades Horizontais Simulados em m/s na superfície e a 90 metros de profundidade, respectivamente (Tanaka, 1977)

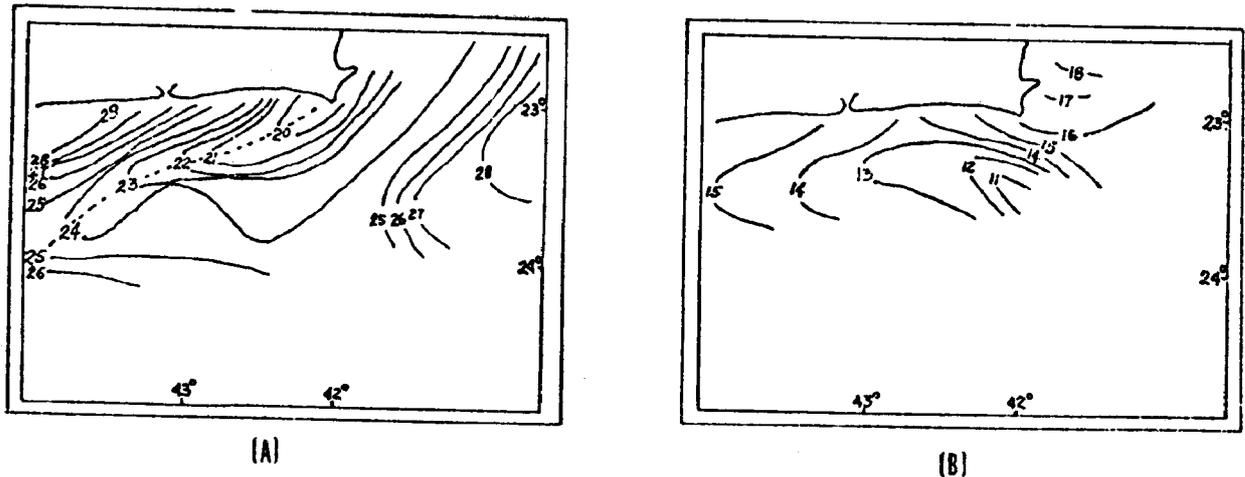


Fig. 7 - (A) e (B) - Distribuição da temperatura, em $^{\circ}\text{C}$ na superfície e no fundo, respectivamente, em condições de ressurgência (Rodrigues, 1977)

As imagens citadas associadas a outras da faixa do infravermelho termal, também obtidas pelo satélite LANDSAT, representariam o sistema ideal para uma interpretação mais apurada dos fenômenos oceanográficos presentes em Cabo Frio. Infelizmente, problemas no sensor correspondente ao imageador MSS-8 do LANDSAT-3, não permitem ainda a avaliação destas imagens termais.

Entretanto, dados do imageador termal LN-3 do Instituto de Pesquisas Espaciais, utilizado durante o cruzeiro oceanográfico Cabo Frio I, segundo Tanaka (1977), mostraram a existência de uma massa de água mais fria localizada sobre uma dessas células de ressurgência (a mais alongada junto à costa). É provável, assim, admitir que uma pesquisa mais apurada, com o uso dos sensores remotos na faixa do infravermelho termal, sobre as regiões geográficas onde estão indicadas as células de ressurgência, forneça elementos para a compreensão dos fortes movimentos advectivos já discutidos anteriormente.

4. CONCLUSÕES

Há um ajuste razoável entre as informações obtidas pelas observações oceanográficas do cruzeiro Cabo Frio I e pela interpretação das imagens do satélite LANDSAT, com os resultados do modelo matemático linear para simular as correntes induzidas pelo vento.

Tal ajuste foi verificado não só quanto à circulação horizontal das águas, como quanto aos movimentos verticais, observados em algumas estações oceanográficas realizadas durante a deriva do navio.

Em consequência, é sugerida uma hipótese, quanto ao comportamento das águas sobre a plataforma continental, que precisa ser verificada, através de dados da temperatura das regiões ocupadas pelas células indicativas de ressurgência, através de imagens térmicas obtidas por sensores remotos orbitais.

AGRADECIMENTOS

Reiteramos os nossos agradecimentos ao Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE, em nome do Diretor Dr. Nelson de Jesus Parada, pelo consentimento da realização do trabalho.

Ao Departamento de Sensoriamento Remoto - DSR, e em particular, aos coordenadores Dr. Claudio Roland Sonnenburg e ao Sr. René Antonio Novaes, que tornaram possível a concretização deste trabalho.

Ao Dr. Renato Herz do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo - IOUSP e assessor do Departamento de Sensoriamento Remoto - DSR, na área de Recursos do Mar, pelas sugestões apresentadas.

Finalmente, os nossos protestos sinceros de agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a efetivação deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

HERZ, R. *Circulação das Águas de Superfície da Lagoa dos Patos.* Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 1977.

RODRIGUES, R.F. *Evolução da Massa D'água durante a Ressurgência em Cabo Frio.* Instituto de Pesquisas da Marinha, Ministério da Marinha, Rio de Janeiro, 1977.

TANAKA, K. *Simulação da Ressurgência Comparada com Dados Oceanográficos e de Sensores Remotos em Cabo Frio.* São José dos Campos, Instituto de Pesquisas Espaciais, 1977. (INPE-1085-TPT/061).