



CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS DE RESSURGÊNCIA EM CABO FRIO POR MEIO DOS DADOS DE UMA BOIA METEOCEANOGRÁFICA DO PROGRAMA NACIONAL DE BOIAS (PNBOIA): MARÇO DE 2012 A FEVEREIRO DE 2013

*Autores: Alexandre Luiz Coelho¹
Thaise Sena Oliveira²
Juliana Marques Coelho Borba³
Thalita Mirian Santos Furtado⁴
Eduardo José Araújo Correia Lima⁵
Hélio Jorge da Paixão Marques⁶*

RESUMO

Por meio da análise temporal dos dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) obtidos pela boia "Cabo Frio" do PNBOIA, localizada em frente a Arraial do Cabo, a 3 km da costa, dos dados de ventos do modelo ERA5 (reanálise) e da identificação de períodos em que a TSM esteve igual ou inferior a 18°C, foi possível caracterizar 16 eventos de ressurgência costeira. A maioria destes eventos ocorreu na primavera (5)

e no verão (6). As direções dos ventos que induziram estes eventos foram predominantemente de nordeste (35° - 65°), com uma frequência de 43%. Sob a influência destes ventos de nordeste, o maior tempo decorrido para que a TSM resfriasse até 18°C foi de 87 h, no inverno, provavelmente porque quando o vento entrou no primeiro quadrante a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) estava mais distante da costa e em regiões mais profundas. Na primavera e no verão, por outro lado, estes tempos

¹ Professor Titular do CIAARA. Oceanógrafo pela UERJ. Mestre e Doutor em Oceanografia Física pelo Instituto Oceanográfico da USP (IOUSP).

² Oceanógrafa pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestre em Oceanografia Geológica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

³ Oceanógrafa pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Mestre em Oceanografia Física pela UFMA.

⁴ Oceanógrafa pela UFMA. Pós-graduanda em Meteorologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

⁵ Diretor de Projetos de Mar Aberto da Empresa Junior de Oceanografia da UFPE. Graduando em Oceanografia pela UFPE (9º período).

⁶ Estagiário do Laboratório de Oceanografia Física da UERJ. Graduando em Oceanografia pela UERJ (6º período).



de resposta foram menores. A média sazonal da TSM variou inversamente com a frequência, a duração e intensidade térmica dos eventos, sendo mínima na primavera, quando ocorreram os eventos mais longos e frios. O transporte de Ekman foi para sudeste, sendo as componentes meridionais (*offshore*) maiores do que as componentes zonais. Durante os eventos de ressurgência, com a intensificação do vento, houve uma consequente intensificação do transporte de Ekman e da camada de Ekman, com resfriamento da TSM. Durante dez eventos de ressurgência, a camada de Ekman ocupou toda a coluna d'água, indicando o preenchimento desta pela ACAS. A partir desta análise, é possível observar que a intensidade térmica dos eventos de ressurgência depende da duração do vento, da posição em que a ACAS se encontra na plataforma continental quando o vento entra no primeiro quadrante e do percentual de massa que a ACAS apresenta nesta posição.

Palavras-chave:

TSM; Ressurgência costeira; ACAS, Transporte de Ekman; Camada de Ekman, Percentual de massa d'água.

ABSTRACT

By the analysis of Sea Surface Temperature (SST) obtained from the "Cabo Frio" buoy of PNBOIA, located in front of Arraial do Cabo, 3 km *offshore*; of winds' data from the model ERA5 (reanalysis); and of the identification of periods in which the SST had been equal or below 18°C, it was possible to characterize 16 coastal upwelling events. most of these events had occurred spring (5) and in the summer (6). The directions of the winds which induced these events were predominantly Northeast (35° to 65°), with a 43% frequency. Under

the influence of these NE winds, the longest period of time for the SST to cool down to 18°C was 87h, in winter, probably because when the wind reached in the first quadrant the South Atlantic Central Water (SACW) was distant from the coast and in deep waters. In spring and summer, on the other hand, the response times were shorter. The seasonal average of SST varied inversely with the frequency, the duration and the thermal intensity of the events, as minimal in spring, when the longest and coldest winds occurred. The Ekman Transport went southeast, being the meridional components (*offshore*) were bigger than the zonal components. During the upwelling events, as the winds intensified, a consequent intensification of the Ekman Transport and of the Ekman layer had occurred, with the SST cooling down. During 10 upwelling events, the Ekman layer occupied the entire water column, indicating to the filling of this one by the SACW. From this analysis, it is possible to observe that the thermal intensity of the upwelling events depends on the wind's duration, on the position in what SACW is in the continental shelf when the wind reaches in the first quadrant and on the mass percentage presented by the SACW in this position.

Keywords:

Sea Surface Temperature; Coastal upwelling; SACW; Ekman transport; Ekman layer; Water mass percentage.

1. INTRODUÇÃO

1.1 A Região de Estudo

A região de Arraial do Cabo (Figura 1) está localizada (23° 00'S e 42° 00'W) na costa leste do estado do Rio de Janeiro, sendo

parte da Plataforma Continental Sudeste (PCSE) que se estende desde Cabo Frio (23°S) até o Cabo de Santa Marta (28° 40' S), em Santa Catarina.

O alinhamento geral da costa brasileira do Rio Grande do Sul até Pernambuco ocorre no sentido Nordeste-Sudoeste, enquanto o litoral entre a cidade do Rio de Janeiro e Arraial do Cabo tem alinhamento Leste-Oeste (Muehe, 1979). É, também, o único trecho de costa com escala de comprimento da ordem de dezenas de quilômetros, voltada para o Sul (Torres Jr., 1995). A plataforma continental de Cabo Frio tem largura de 80 km, com intenso gradiente batimétrico próximo à costa, onde as isóbatas de 50 m e 100 m localizam-se a 5 km e 7-20 km da costa, respectivamente (Valentin & Kempf, 1977; Valentin *et al.*, 1987). Esse estreitamento da plataforma, a disposição da linha de costa, o gradiente abrupto de profundidade e o padrão de ventos NE/E de alta frequência e intensidade

são fatores essenciais que possibilitam a presença do fenômeno de ressurgência costeira, caracterizado pelo afloramento da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) próximo à costa (Rodrigues e Lorenzetti, 2001).

1.2 Estudos Anteriores

A “ressurgência” é um termo utilizado para designar o movimento ascendente de águas frias e ricas em nutrientes, oriundas de camadas inferiores do oceano, que fertilizam a zona eufótica e, assim, estimulam a produtividade primária (Torres Jr, 1995; Souza, 2006).

Devido à produtividade biológica elevada, as áreas de ressurgência costeira têm sido muito estudadas, principalmente, pela associação com estoques de peixes economicamente importantes (Souza, 2006). Nas margens lestes dos oceanos estão localizadas as principais áreas de ressurgência costeira, associadas às correntes

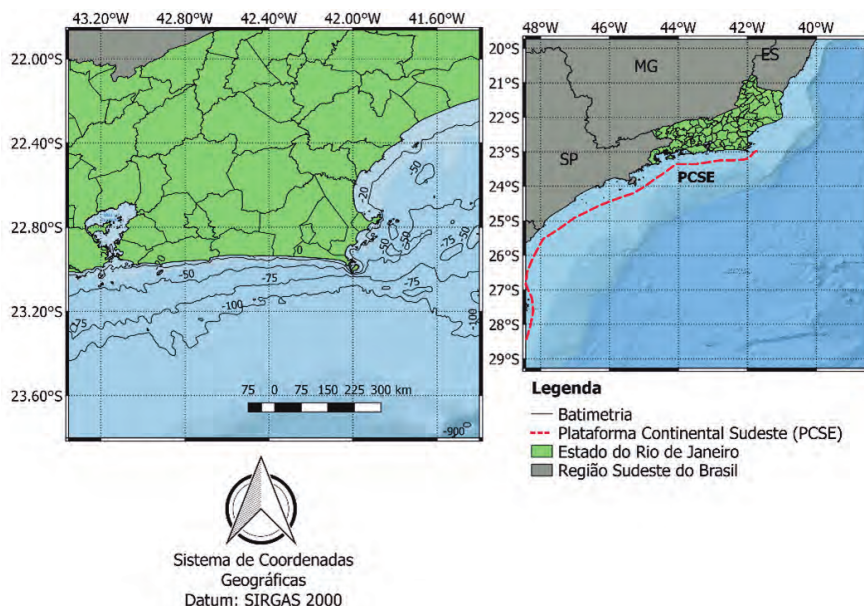


Figura 1 – Plataforma continental de Cabo Frio e sua localização na Plataforma Continental Sudeste (PCSE).



da Califórnia, do Peru e de Benguela (Mann e Lazier, 1991). Além disso, a alteração da temperatura superficial da água pode provocar uma mudança no clima local, influenciando em processos atmosféricos como a brisa marítima (Gilliam *et al.*, 2004). Embora a ocorrência desse fenômeno se dê principalmente nas bordas leste dos oceanos, ele é registrado em alguns pontos da costa brasileira, sendo mais notável na região de Cabo Frio, localizada no Estado do Rio de Janeiro.

O estudo pioneiro sobre a ressurgência em Cabo Frio foi o de Allard (1955), que observou a forte correlação entre o vento e a temperatura superficial da água do mar, verificando uma diminuição da temperatura associada ao vento de Nordeste e uma elevação com o vento de Sudoeste.

Tanaka (1986) verificou que existe uma forte correlação entre a TSM, a direção do vento e sazonalidade da ressurgência. O autor, também, concluiu que a ressurgência ocorre com mais frequência na primavera e no verão. Posteriormente, outros trabalhos também identificaram esta maior frequência (Torres Jr, 1995; Ribeiro, 2010; Bertoldi, 2019).

É consenso entre diversos autores (Emilson, 1961; Ikeda *et al.*, 1974; Ikeda, 1976; Rodrigues, 1977; Gama de Almeida & Tanaka, 1981; Valentin *et al.*, 1987; Torres Jr, 1995; Castro, 1996; Castro & Miranda, 1998; Rezende, 2003; Elias, 2009; Passos, 2015; Castro *et al.*, 2015; Medeiros, 2020) que não há ressurgência costeira em Cabo Frio se não houver ventos de nordeste-leste forçando a circulação de plataforma.

De acordo com as teorias clássicas de ressurgência (Ekman, 1905; Defant, 1961) o afloramento de águas subsuperficiais se deve à divergência do transporte de Ekman perpendicular à costa associada com a componente paralela à costa do vento. Portanto,

a ressurgência costeira é induzida pelo vento, tendo o seu processo físico duas componentes: as divergências costeiras do transporte de Ekman impostas pela presença da costa e pelo rotacional da tensão de cisalhamento do vento. (Pond & Pickard, 1983). O transporte de Ekman é o volume de água que se desloca perpendicularmente ao vento devido à ação da força de Coriolis sobre a circulação gerada pela tensão de cisalhamento do vento. A divergência positiva do transporte de Ekman implica, por continuidade, na ascensão de águas frias oriundas das camadas de fundo (Ekman, 1905). Usualmente, faz-se a avaliação da divergência imposta pela costa calculando-se o transporte de Ekman diretamente a partir da tensão de cisalhamento do vento, enquanto a avaliação da influência do rotacional do vento é obtida pelo cálculo do bombeamento de Ekman (Pond & Pickard, 1983; Castelão & Barth, 2006). Estes últimos autores avaliaram os efeitos do transporte de Ekman e do bombeamento de Ekman na ressurgência em Cabo Frio e concluiu que, durante o verão, seus valores são altos e têm magnitudes similares.

A estrutura termohalina da plataforma continental de Cabo Frio, da mesma forma que em toda a PCSE, é definida pela mistura de três massas de água: a Água Costeira (AC), caracterizada pelas baixas salinidades ($S < 35$); a ACAS com temperaturas inferiores a 18°C e salinidades menores que 36; e a Água Tropical (AT), caracterizada pelas altas salinidades superiores a 36 (Castro *et al.*, 2015).

A AT e a ACAS são transportadas pela Corrente do Brasil (CB) e situam-se quase permanentemente na parte mais externa da plataforma continental em continuidade à estrutura existente no talude continental (Emilson, 1961; Miranda, 1982). A AT ocupa a camada superficial (0-150 m) e a ACAS situa-se na termoclina permanente entre 150



e 600 m (Silveira *et al.*, 2015). O grau de intrusão em direção à costa destas duas massas de água, juntamente com a extensão e características físicas da AC, determina o volume de cada uma destas massas de água na plataforma continental, definindo o formato das isopícnais (Castro *et al.*, 2015).

Na PCSE, durante os eventos de ressurgência, o transporte de Ekman afasta a Água Costeira (AC) em direção ao largo, implicando intrusão da ACAS pela camada de fundo com seu consequente afloramento (Castro *et al.*, 2015).

A ressurgência costeira em Cabo Frio é um processo que não depende somente do vento com direções de Nordeste a Leste, mas também da disponibilidade e intensidade da ACAS na plataforma continental (Torres Jr, 1995; Coelho, 1997; Coelho, 2010; Castro *et al.*, 2015; Passos, 2015; Medeiros, 2019). Esta disponibilidade da ACAS refere-se à posição em que esta massa de água se encontra na plataforma continental, variando em escala sazonal e sinótica (Coelho, 2010; Castro *et al.*, 2015). Quanto mais próxima da costa e mais rasa a ACAS estiver, mais rapidamente o seu afloramento ocorrerá (Torres Jr, 1995). Já a intensidade da ACAS, decorrente, principalmente, de quão fria a água está, pode ser avaliada pelo cálculo do percentual que esta massa de água possui em relação ao seu índice termohalino, que é um par (S,T) representando suas características termohalinas na borda da PCSE e determinado a partir do triângulo de mistura (Castro *et al.*, 2015).

Amor (2004) concluiu que a intrusão da ACAS na plataforma continental em escala sazonal, está associada a oscilações sobre o oceano, na mesma escala, da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Intrusões e afastamentos da ACAS também ocorrem em escala subinercial ou sinótica, de 2 a 20 dias (Coelho, 1997; Coelho, 2010; Castro *et al.*, 2015), associadas,

respectivamente, à duração do vento NE/E, favorável a ressurgência, e às passagens de frentes frias, que implicam ventos do terceiro quadrante geográfico. Portanto, dois sistemas meteorológicos influenciam o regime de ventos em Cabo Frio: o ASAS e os sistemas meteorológicos frontais.

O Anticiclone Semipermanente do Atlântico Sul (ASAS) é um sistema de alta pressão semipermanente produzido pela subsidência do ar quente e úmido equatorial que migra para os polos e está centrado próximo à latitude de 30° S. O ASAS é o principal responsável por gerar um vento dominante no quadrante NE em Cabo Frio, que está relacionado à migração deste sistema. O seu deslocamento longitudinal varia sazonalmente, estando mais a Leste nos meses de outubro e abril, e entre janeiro e março posicionando-se mais a oeste em julho e agosto (Machel *et al.*, 1998). A migração latitudinal varia conforme a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que pressiona o anticiclone para uma posição mais ao sul durante o verão (dezembro, janeiro e fevereiro), sendo estes os meses em que há uma potencialização dos ventos NE. Por outro lado, durante o outono e o inverno o ASAS se localiza mais ao norte, as frentes frias são mais intensas e, conseqüentemente, os ventos dominantes de NE-E enfraquecem (Castro, 1996).

Durante a passagem de uma frente fria, os ventos de SW invertem a dinâmica de Ekman, com o transporte na camada de Ekman superficial ocorrendo em direção à costa, havendo o afastamento da ACAS pelo fundo (Candella, 1999; Amor, 2004; Coelho, 2008; Castro *et al.*, 2015; Bertoldi, 2019). No inverno, as frentes frias são mais intensas e o ASAS tende a estar mais ao norte, o que diminui a frequência de eventos de ressurgência. (Tanaka, 1986, Silva *et al.*, 2006; Ribeiro, 2010; Bertoldi, 2019)



Silva *et al.* (2006), analisando 11 anos de dados, denominaram o período em que a TSM fica igual ou inferior a 18°C como Tempo de Permanência da Ressurgência. Ao intervalo de tempo entre o instante no qual o vento entra no primeiro quadrante e o instante em que a TSM atinge 18°C, nomeou Tempo de Resposta. O período entre o instante em que o vento deixa o quadrante NE e o instante em que a TSM fica superior a 18°C foi denominado de Tempo de Volta. Com isto, o autor estabeleceu valores climatológicos para esses tempos, concluindo que, no verão os tempos de resposta são mínimos e os eventos de ressurgência são mais duradouros por causa dos ventos NE mais frequentes proporcionados pela posição mais ao sul do ASAS. Concluiu, também, que, no inverno, o fim da ressurgência ocorre mais rapidamente por causa da maior intensidade das frentes frias.

Ribeiro (2010) observou que os eventos de ressurgência são mais frequentes no verão e na primavera, variando inversamente com a média da TSM. Concluiu que esta frequência se deve à maior disponibilidade da ACAS nestas estações.

Em estudo recente, Bertoldi (2019), a partir dos dados de uma boia meteorológica, identificou 21 eventos de ressurgência no biênio julho/2013 – julho/2015, concluindo principalmente que: i) os eventos foram mais frequentes na primavera e verão devido ao posicionamento mais ao sul da ASAS; ii) a direção média do transporte de Ekman foi Sudeste (SE), em resposta ao efeito de Ekman associado aos ventos mais frequentes e intensos de Leste e Nordeste; iii) a componente meridional do transporte de Ekman foi mais intensa do que a componente zonal; iv) as variações das espessuras da camada de Ekman responderam às variações da intensidade do vento, sendo maiores quando os ventos eram mais intensos; e v) a TSM mínima foi 13,3°C em novembro de 2014.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

1. Identificar os eventos de ressurgência costeira que ocorreram em Cabo Frio entre março de 2012 e fevereiro de 2013, a partir da série temporal de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), de uma boia meteorológica do PNBOIA/CHM e das séries temporais de intensidade e direção do vento, obtidas com o modelo ERA5;

2. Calcular os tempos de resposta e de permanência para cada evento de ressurgência costeira identificado, bem como o intervalo de tempo entre o instante em que o vento deixa o quadrante NE e o instante em que a TSM fica maior que 18°C, caracterizando o fim do evento de ressurgência;

3. Relacionar os eventos de ressurgência costeira com a disponibilidade da ACAS na plataforma continental e com a duração dos ventos de Nordeste a Leste (NE/E); e

4. Determinar a série temporal do transporte de Ekman e da espessura da camada de Ekman, caracterizando suas variações durante o processo de ressurgência.

3. DADOS E MÉTODOS

3.1 Dados de Temperatura Superficial do Mar (TSM)

Os dados de Temperatura Superficial do Mar (TSM) para o período de março de 2012 a fevereiro de 2013 foram oriundos da boia meteorológica *Watchkeeper*. A boia *Watchkeeper* (Cabo Frio, antiga) foi implantada e operada pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), sendo uma atividade integrante do Programa Nacional de Boias (PNBOIA). Esteve fundeada a uma profundidade de 45 m, na coordenada (42° 06,00' W; 22° 58,80' S), a uma distância de 3 km da costa (Figura 2). Essa boia foi configurada para realização de um ciclo a cada hora,

iniciando na hora cheia. As variáveis ambientais (ondas, vento, correntes, temperatura do ar, temperatura da superfície do mar,

etc.) foram coletadas durante os primeiros 20 minutos, seguindo a configuração apresentada na Tabela 1.

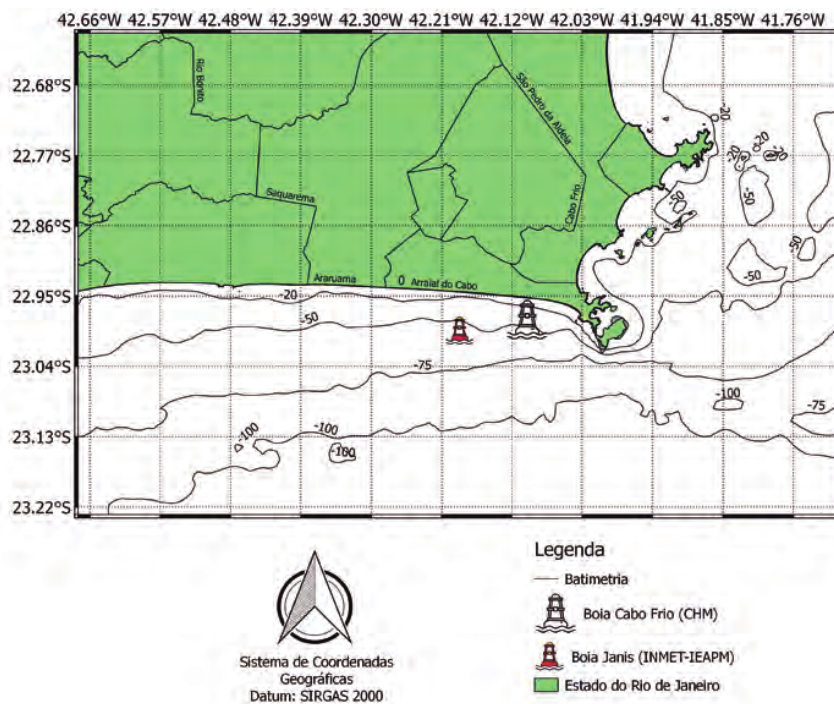


Figura 2 – Localização da boia Cabo Frio do CHM/PNBOIA e da boia Janis do IEAPM/INMET.

Tabela 1 – Configuração de coleta dos dados ambientais da boia *Watchkeeper* (Cabo Frio)

Configurações de coleta da Boia Cabo Frio antiga	
0 min	Verificação da posição pelo GPS
0 min a 5 min	Coleta de dados com o ADCP
0 min a 10 min	Coleta de dados meteorológicos, oceanográficos e de status da boia
0 min a 20 min	Coleta de dados de onda

3.2 Produto das Componentes Zonal e Meridional do Vento da Reanálise ERA5

Os produtos horários das componentes zonal e meridional do vento a 10 m para o ponto de fundeio da boia (Figura 1), no

período entre março de 2012 e fevereiro de 2013, foram oriundos da reanálise oceânica ERA5, com resolução horizontal de 0,25° em longitude, 0,25° latitude e 137 níveis verticais em coordenadas sigma (HERBACH, *et al.*, 2018). A reanálise ERA5 é um produto



implementado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), que é desenvolvido pelo *Copernicus Climate Change Service* e produzido com assimilação de dados em quatro dimensões da atmosfera e superfície, por meio do Sistema de Previsão integrada do ECMWF. Esses produtos podem ser acessados no sítio de internet do ECMWF (2021).

A reanálise combina dados de modelo com dados observacionais de todo o mundo em um conjunto completo e consistente de dados globais. Este princípio, chamado assimilação de dados, baseia-se no método utilizado pelos centros numéricos de previsão do tempo, no qual a cada determinado período de tempo (12 horas no ECMWF), uma previsão anterior é combinada com observações recém-disponíveis de uma maneira otimizada para produzir uma nova e melhor estimativa do estado da atmosfera, a partir do qual uma previsão atualizada e melhorada é emitida (herbach *et al.*, 2018).

3.3 Cálculo das Direções do Vento

As direções dos ventos foram calculadas a partir das componentes zonais e meridionais do ERA5, do seguinte modo (Bluestein, 1992):

$$DIR = \text{arcotangente} \left(\frac{U}{V} \right) \text{ Eq. 1}$$

Sendo:

DIR: direção do vento;

U: componente zonal do vento a 10 m; e

V: componente meridional do vento a 10 m.

Foram considerados os sinais de U e V na redução dos ângulos calculados aos quadrantes geográficos: 1º quadrante (NE): U e V negativos; 2º quadrante (SE): U < 0 e V > 0; 3º quadrante (SW): U e V positivos; e 4º quadrante (NW): U > 0 e V < 0.

3.4 Cálculo da Tensão de Cisalhamento do Vento

A tensão de cisalhamento do vento τ é a força friccional resultante do vento atuando sobre a superfície do mar e pode ser expressa pelas seguintes equações (Kutsuwada, 1998):

$$\tau_x = \rho_{ar} \times C_D |W| \times U \text{ (componente zonal) Eq. 2}$$

$$\tau_y = \rho_{ar} \times C_D |W| \times V \text{ (componente meridional) Eq. 3}$$

Onde:

ρ_{ar} : representa a densidade do ar (1,22 kg/m³);

U e V representam as componentes zonal e meridional do vento a 10 m, respectivamente; W é a velocidade do vento em m.s⁻¹; e

C_D o coeficiente de arrasto, obtido pela equação descrita em Large e Yeager (2004):

$$C_D = 10^{-3} \left(\frac{2,7}{W} + 0,142 + \frac{W}{13,09} \right) \text{ Eq. 4}$$

3.5 Cálculo da Espessura da Camada de Ekman

A espessura da Camada de Ekman foi calculada de acordo com Pond e Pickard (1983):

$$D_e = \frac{4,3 |W|}{\sqrt{\sin |\theta|}} \text{ Eq. 5}$$

Onde:

|W|: Intensidade ou módulo do vento; e

θ : latitude

3.6 Cálculo do Transporte de Ekman

O transporte de volume na camada de Ekman, perpendicular à tensão do vento aplicada à camada superficial da água, varia diretamente com essa tensão e inversamente com

o parâmetro de Coriolis e com a densidade da água do mar. É expresso em volume ($m^3 \cdot s^{-1}$) por unidade de distância (largura ou comprimento), tendo, portanto, unidades de $m^2 \cdot s^{-1}$.

O transporte zonal é calculado em função da componente meridional do vento, e o transporte meridional é função da componente zonal do vento, sendo calculados conforme Pond e Pickard (1983):

$$M_x = \frac{\tau_y}{\rho f} \text{ (transporte de volume zonal) Eq. 6}$$

$$M_y = \frac{-\tau_x}{\rho f} \text{ (transporte de volume meridional) Eq. 7}$$

Onde:

M: representa o transporte de Ekman;

χ : direção Leste-Oeste (componente zonal);

γ : direção Norte-Sul (componente meridional);

ρ : é a densidade da água do mar. Foi utilizado o valor de 1.025 kg m^{-3} , representando um valor médio para águas costeiras;

F : é o parâmetro de Coriolis definido como $f_0 = 2\Omega \sin(\theta_0)$, considerando o plano f , isto é, que as distâncias meridionais na plataforma continental de Cabo Frio são pequenas o suficiente para considerar f constante;

Ω : (velocidade angular da Terra) = $7,29 \times 10^{-5} s^{-1}$; e

θ_0 é a latitude.

3.7 Cálculo dos Tempos de Resposta, de Permanência e de Término da Ressurgência.

Na Figura 3, estão apresentados os instantes considerados para a determinação dos Tempos de Permanência, de Resposta e de Término da Ressurgência costeira (SILVA *et al.*, 2006). O Tempo de Resposta inicia-se no instante em que o vento adquire uma postura permanente no 1º Quadrante, ou seja, no Quadrante de Nordeste (QNE), indicado no gráfico por V_i . O vento atua regularmente sobre a superfície do mar, fazendo com que a água superficial se desloque em direção ao largo, dando espaço para que a água de fundo, mais fria, chegue à superfície. O instante T_i é o instante em que a TSM atinge $18^\circ C$. Assim, o tempo de resposta (t_r) da ressurgência é calculado como a diferença entre o instante em que o vento inicia a permanência no Quadrante Nordeste e o instante em que a temperatura da superfície do mar atinge $18^\circ C$, conforme Silva *et al* (2006):

$$t_r = (T_i - V_i) \text{ Eq.8}$$

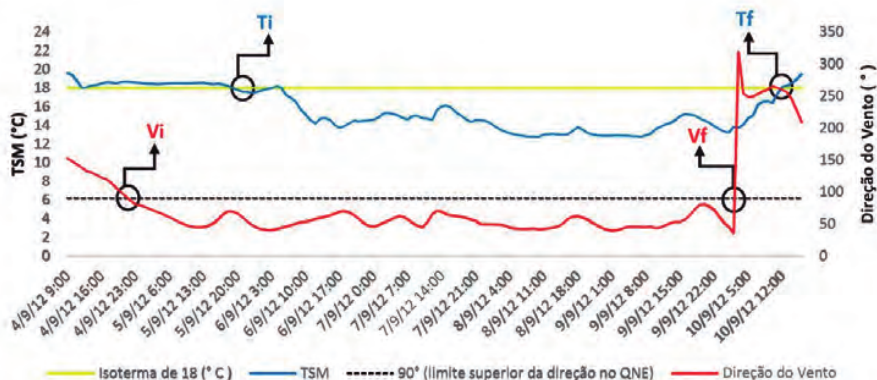


Figura 3 – Séries temporais de direção do vento e TSM e com os instantes utilizados para o cálculo dos tempos de resposta, de permanência de volta da ressurgência costeira. V_i é o instante em que o vento adquire uma direção permanente no primeiro quadrante (QNE); T_i é o instante em que a TSM atinge $18^\circ C$; V_f é o instante em que o vento deixa o primeiro quadrante; e T_f é o instante em que a TSM fica maior que $18^\circ C$.



De acordo com Silva *et al.*, 2006, para que o evento seja considerado ressurgência, a temperatura superficial da água deve permanecer com 18 °C ou inferior por, pelo menos, dois dias no verão e na primavera. Caso seja inverno, a temperatura deve se manter abaixo dos 18 °C por, pelo menos, quatro dias.

O Tempo de Permanência (t_p) da ressurgência é o intervalo de tempo entre os instantes T_i e T_f de acordo com Silva *et al* (2006).

$$t_p = T_f - T_i \text{ Eq.9}$$

O Tempo de Volta (t_v) é definido pela diferença entre o instante em que o vento sai do quadrante NE (V_f) e o instante em

que a temperatura atinge valor superior à 18°C, conforme Silva *et al.* (2006):

$$t_v = (T_f - V_f) \text{ Eq.10}$$

Neste trabalho, o termo Tempo de Volta é designado por Tempo de Fim da Ressurgência (t_f).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observa-se na Figura 4 que os eventos de ressurgência, isto é, os períodos em que a TSM ficou igual ou abaixo de 18 °C, ocorreram com maior frequência entre setembro e fevereiro, portanto, durante a primavera e o verão.

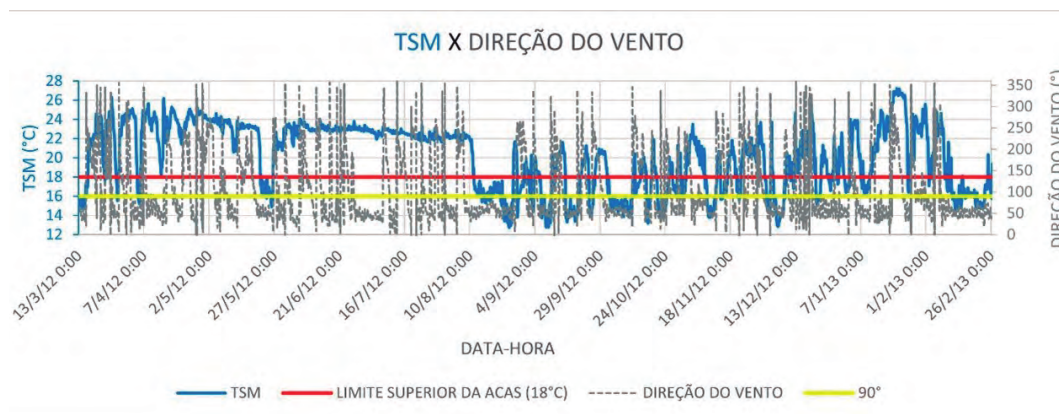


Figura 4 – TSM e direção do vento entre março de 2012 e fevereiro de 2013. A linha azul representa a TSM; a linha tracejada, a direção do vento; a linha vermelha o limite térmico superior da ACAS de 18°C; e a linha amarela, indica o limite superior da direção no primeiro quadrante geográfico (90°).

Entretanto, também houve a ocorrência de ressurgência tanto no outono quanto no inverno.

Na Figura 5, estão apresentados dois histogramas direcionais do vento (rosas do vento) para todo o período analisado. Na Figura 5a, ressalta-se a ocorrência de 59% das direções dos ventos entre 30° e 90°, enquanto na Figura 5b vê-se que 43% das direções encontram-se centrados entre 40° e 60°. A classe onde as direções são mais frequentes

está centrada em 40° com 17% de frequência, a segunda classe mais frequente está centrada em 50° (15%) e a terceira em 60° (11%). Assim, pode-se afirmar que os ventos entre 35° e 65° são os mais frequentes, implicando transportes de Ekman entre 125° e 155°, no quadrante sudeste e centrados em 140°. Tais ocorrências mostram que o vento NE/E (45°- 90°) foi o mais frequente no período estudado, justificando a frequência da

ressurgência costeira. A direção média anual obtida através do arco tangente da razão entre as médias anuais das componentes zonais (-3,18) e meridionais (-1,69) do vento

foi 62°. Esta direção ocorre na terceira classe mais frequente, estando, portanto, a média próxima da moda.

Na Tabela 2, estão apresentadas

HISTOGRAMA DIRECIONAL DOS VENTOS MARÇO/2012 A FEVEREIRO/2013

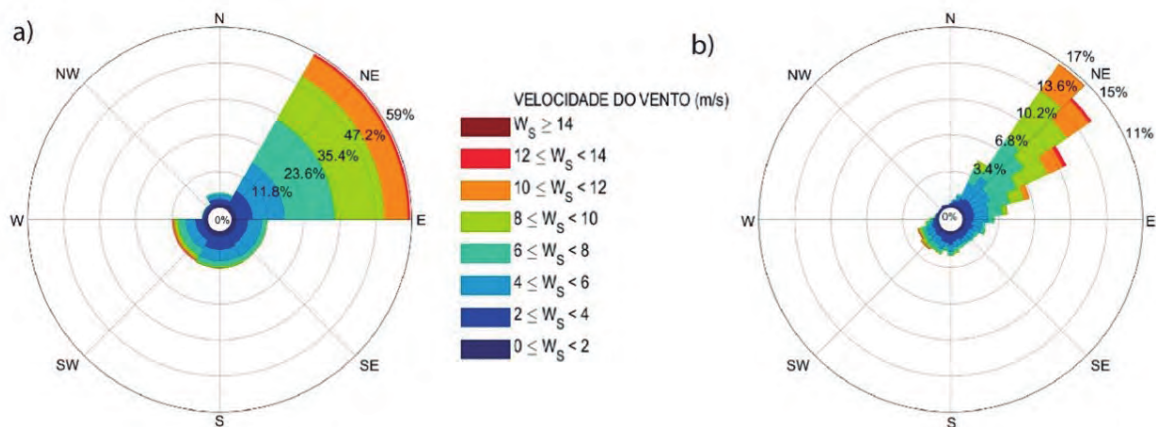


Figura 5 – Histograma direcional dos ventos para o período entre março/2012 e fevereiro/2013. a) 6 classes de largura 60° [330° – 30°; 30°-90°; 90°-150°; 150°-210°; 210°-270°; 270°-330°]; b) 36 classes de largura 10°, sendo as três maiores frequências: 17% (35°-45°); 15% (45°-55°) e 11% (55°-65°).

estatísticas da TSM deste trabalho (Boia Cabo Frio) e comparadas às de Bertoldi (2019), obtidas com os dados da boia "Janis", do INMET (Figura 2). As diferenças de quase 1°C entre as temperaturas superficiais médias (0,87°C) e entre os valores máximos (2,69°C) podem estar associadas aos períodos diferentes das séries (1 e 2 anos). O fato da boia do CHM ter sido posicionada em uma região mais rasa pode explicar a diferença entre os valores mínimos (0,57 °C). Pode-se observar na Figura 6, que é uma seção transversal em frente ao Cabo Frio, obtida por Rezende (2003) durante um processo de ressurgência costeira, que em locais mais próximos da costa, a TSM

está mais fria devido à ascensão da termoclina. Portanto, à medida que a ressurgência se intensifica, a TSM pode ficar mais fria em locais mais rasos próximos da costa, com as isotermas de menores valores interceptando a superfície em locais com profundidades menores. Assim, a diferença de 15 m entre as profundidades das boias é significativa para os eventos de ressurgência, uma vez que a água que se encontra em subsuperfície na região mais profunda pode estar em superfície na região mais rasa. Castro *et al.* (2015), analisando seções transversais em Cabo Frio, também observaram as mínimas de temperaturas superficiais na região mais costeira.

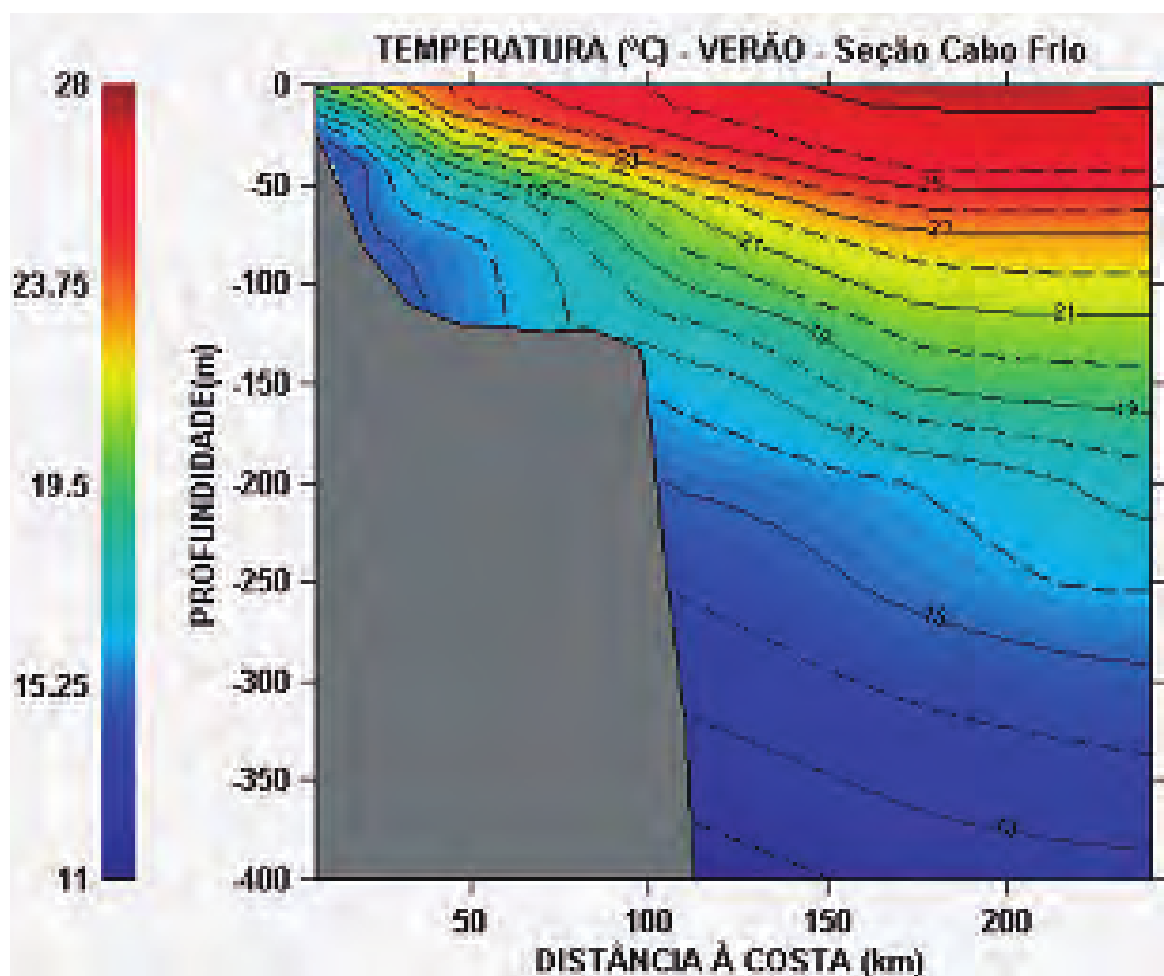


Figura 6 – Seção transversal de temperatura em frente ao Cabo Frio (Fonte: Rezende, 2003)

Tabela 2 – Máximos, mínimos e médias da TSM: Boia "Cabo Frio a" (presente trabalho - de março de 2012 a fevereiro de 2013); – Boia "Janis" (Bertoldi (2019) - de julho de 2013e a julho de 2015).

BOIA	PROF. LOCAL (m)	TSM MÍNIMA (°C)	TSM MÁXIMA (°C)	MÉDIA	DESVIO-PADRÃO
Boia Cabo Frio antiga	45	12,74	27,22	20,16	3,36
Boia Janis	60	13,31	29,91	21,03	2,77



4.1 Tempos de resposta, de permanência e de fim da ressurgência

São apresentados na Tabela 3 os tempos de permanência, de resposta e de término da ressurgência costeira. O tempo de resposta é o tempo decorrido para que a temperatura superficial atinja 18°C, após o vento ter entrado no primeiro quadrante; o tempo de permanência refere-se ao período em que a TSM ficou igual ou inferior a 18°C; e o tempo de término é o tempo necessário para que a temperatura fique superior a 18°C após o vento ter saído do primeiro quadrante. Onde lê-se "ND", significa que a resposta da água à mudança da direção do vento não pode ser determinada conforme o método de Silva *et al.* (2006). Diferentemente deste autor, optou-se por não utilizar o tempo médio, por haver poucas amostras ou apenas uma amostra em cada mês.

Observa-se que os maiores tempos de resposta ocorreram tanto no verão (83 h e 92 h) quanto no inverno, em agosto de

2012 (87 h), enquanto os menores valores ocorreram na primavera. Com exceção desses dois tempos do verão, os resultados são semelhantes aos de Silva *et al.* (2006). Estes autores, entretanto, obtiveram uma média para a primavera (~ 44 h) que é cerca de o dobro dos valores do presente trabalho. Tal diferença pode ser porque o valor de Silva *et al.* (2006) é uma média e, assim, pode haver um evento em que a ACAS esteja mais próxima da costa e em níveis mais rasos e demande menos tempo para alcançar a superfície. Na PCSE, este modo de posicionamento da ACAS já foi evidenciado por diversos autores durante o verão e a primavera (Castro *et al.*, 1996; Coelho, 1997; Castro & Miranda, 1998; Rezende, 2003; Castro *et al.*, 2015; Medeiros, 2020), e até no inverno (Medeiros, 2020). Por outro lado, os tempos de resposta são maiores no inverno pelo fato da ACAS usualmente estar mais afastada da costa e mais profunda (Coelho, 2007), demandando, desse modo, mais tempo para ressurgir em superfície.

Tabela 3 – Identificação de cada evento de ressurgência conforme a estação, mês, data, hora, tempo de resposta (t_r), tempos de permanência (t_p) e tempos de fim da ressurgência (t_f). "ND" significa que os tempos não puderam ser determinados conforme o método de Silva *et al.* (2006).

EVENTOS DE RESSURGÊNCIA EM CABO FRIO-RJ									
ESTAÇÃO	Nº DE EVENTOS	MÊS	DATA - HORA				HORAS		
							t_r	t_p	t_f
VERÃO	6	MARÇO	13/03/2012	15:00:00	16/03/2021	15:00:00	ND	72	15
		DEZEMBRO	20/12/2012	18:00:00	22/12/2012	16:00:00	22	49	ND
		DEZEMBRO	25/12/2012	08:00:00	27/12/2012	05:00:00	26	45	ND
		DEZEMBRO	31/12/2012	14:00:00	02/01/2013	13:00:00	83	47	4
		JANEIRO	08/01/2013	01:00:00	10/01/2013	14:00:00	72	62	4
		FEVEREIRO	10/02/2013	19:00:00	26/02/2013	12:00:00	92	393	ND
OUTONO	2	ABRIL	04/04/2012	12:00:00	06/04/2012	00:00:00	63	37	9
		MAIO	21/05/2012	18:00:00	26/05/2012	14:00:00	39	117	ND
INVERNO	3	AGOSTO	11/08/2012	08:00:00	26/08/2012	17:00:00	87	369	23
		SETEMBRO	06/09/2012	06:00:00	10/09/2012	11:00:00	32	102	9
		SETEMBRO	15/09/2012	18:00:00	21/09/2012	06:00:00	22	133	15
PRIMAVERA	5	SETEMBRO	24/09/2012	17:00:00	27/09/2012	01:00:00	15	57	26
		OUTUBRO	01/10/2012	21:00:00	11/10/2012	14:00:00	21	233	6
		OUTUBRO	20/10/2012	18:00:00	25/10/2012	11:00:00	19	113	26
		NOVEMBRO	08/11/2012	05:00:00	12/11/2012	20:00:00	30	111	7
		DEZEMBRO	01/12/2012	05:00:00	09/12/2012	10:00:00	7	197	21



O tempo de permanência máximo (393 h), cerca de 16 dias, ocorreu no verão, em fevereiro de 2013, havendo um pico secundário de 233 h em outubro, na primavera. O tempo mínimo de permanência (37 h) ocorreu em abril. Esses resultados concordam qualitativamente com Silva *et al.* (2006), sendo as diferenças quantitativas devidas ao fato dos tempos do presente trabalho não serem médias. Silva *et al.* (2006) obtiveram tempos de permanência médios entre 90 h e 200 h, exceto em abril, maio e junho (60 h). Com os dados da boia do CHM, além de observar-se o mínimo em abril, não se registraram eventos de ressurgência em junho. Entretanto, em maio ocorreu um evento cuja duração foi praticamente o dobro (117 h) do valor climatológico de Silva *et al.* (2006). Dos dezesseis eventos registrados no presente trabalho, cinco apresentaram duração inferior a 60 h, porém foram eventos relativamente curtos de final de primavera e verão. Nos demais eventos, os tempos de permanência estiveram entre 60 e 400 horas.

Destaca-se o fato de a ressurgência ter durado 362 horas (~15 d) no inverno, em agosto. Silva *et al.* (2006) também registraram a ocorrência de ressurgência em agosto, porém com um tempo médio inferior ao deste trabalho (~100 h). Tanto esse valor quanto o máximo do verão estão associados com a prevalência dos ventos de nordeste. A análise comparativa da TSM com a direção do vento (Figura 4), bem como a análise das rosas de vento (Figura 5), indicam a ocorrência das temperaturas iguais ou inferiores a 18°C concomitantemente com o vento no primeiro quadrante, principalmente entre 40° e 60°, o que justifica o fenômeno da ressurgência costeira. Também pode ser afirmado que quanto maior for a duração destes ventos do primeiro quadrante, maior será o tempo de permanência.

Os maiores tempos climatológicos de permanência são encontrados no verão

e na primavera, estando associados a uma influência mais intensa do ASAS nesses períodos, quando se encontra mais ao sul e proporcionando os ventos NE (SILVA *et al.*, 2006). Entretanto, no presente trabalho foram encontrados tempos de permanência relativamente altos também no outono (maio/2012) e no inverno. O evento duradouro de agosto/2012, observado entre 11/08 e 26/08, está associado a um período em que não houve passagem de sistemas frontais pela região, conforme observado nas cartas sinóticas do CHM, de modo que também prevaleceu o vento NE. A região de Cabo Frio está localizada na área *Charlie* (C) da carta sinótica. Nesse mês, foi verificada a passagem de frentes frias por essa região nos dias 01, 05 e 06. Após esse período, os sistemas frontais que se formaram não atingiram a área C, mas deslocavam-se antes para oeste. desse modo, somente nos dias 26 e 27 houve a passagem de uma frente fria deslocando-se de SW para NE, até a metade dessa área, em frente a Santos, de onde se deslocou posteriormente para leste em direção ao largo (Figuras 7a e 7b). Essa aproximação da frente pode ter inibido o processo de ressurgência costeira.

O evento de verão com a duração máxima de 393 horas, entre 10/02/2013 e 26/02/2013, foi semelhante ao de inverno, sendo inibido pela frente fria que passou por toda área C entre 26/02 e 27/02 (Figura 7c e 7d).

A análise das cartas sinóticas de todo o período deste trabalho revela a influência do ASAS durante os períodos de ventos NE/E, com as passagens das frentes frias usualmente interrompendo estes ventos sobre a plataforma continental e fazendo o vento rondar anticlonicamente para SW, o que inverte a dinâmica de Ekman e inibe o processo de ressurgência costeira. O fato de as frentes frias serem mais frequentes no inverno justifica a baixa frequência de eventos de ressurgência

nessa estação. Isto faz com que a ACAS esteja mais afastada da costa no inverno. Houve também alguns episódios em que o vento entrou no primeiro quadrante e a TSM iniciou uma queda, mas não tingiu os valores iguais ou inferiores a 18°C, como, por exemplo, em abril de 2012.

Os tempos de fim da ressurgência foram inferiores a 28 horas. De acordo com Silva

et al. (2010), os menores valores devem ser encontrados no inverno devido às frentes frias serem mais intensas e ao ASAS estar posicionado mais ao norte. Os resultados presentes não foram mínimos no inverno, mas, sim, em dois eventos de verão (4 h) e um de primavera (7 h). Entretanto, os valores de inverno (9 - 23 h) estiveram nas médias entre junho e agosto (10 - 30 h), segundo Silva *et al.* (2006)

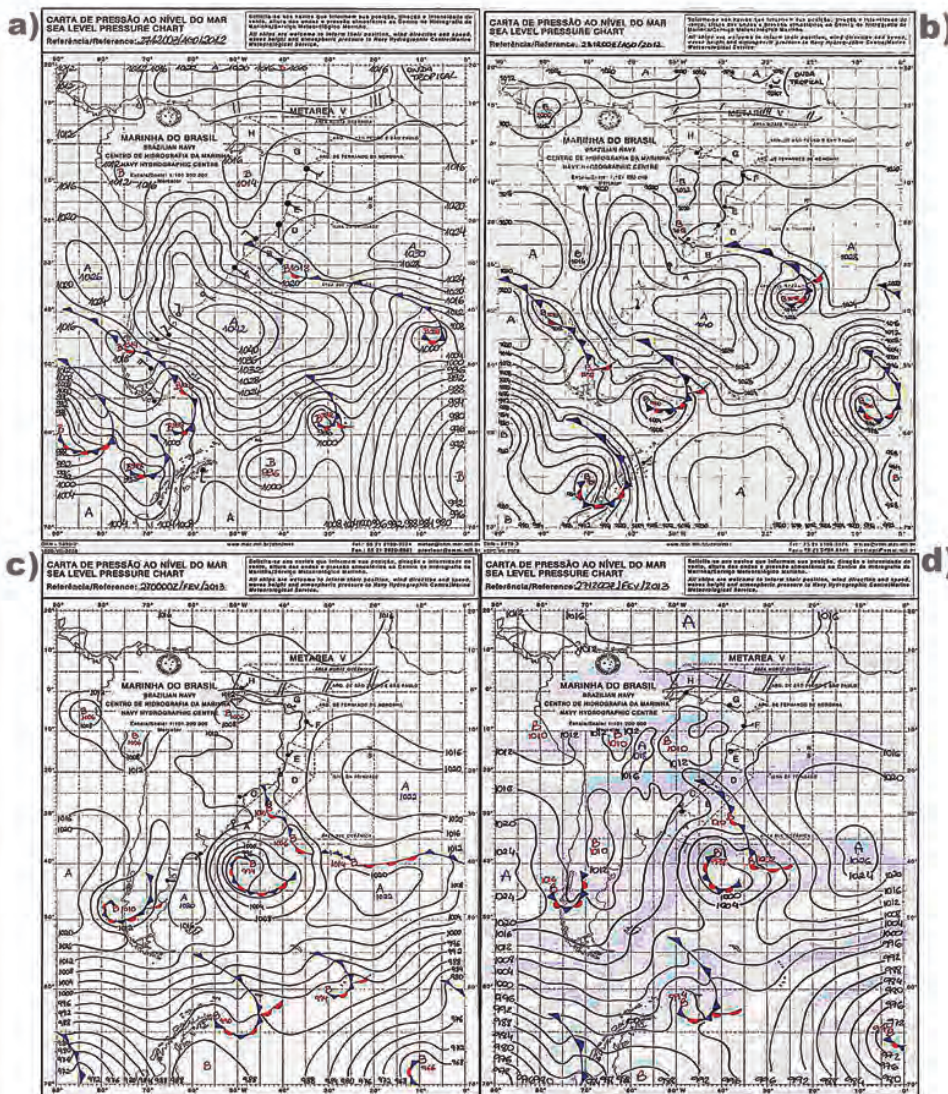


Figura 7 – Cartas sinóticas com posicionamentos das frentes frias que ocorreram em agosto de 2012 e fevereiro de 2013. a) 27/08/12 as 12:00 HMG (Hora Média de Greenwich); b) 28/08/2012 as 00:00 HMG; c) 27/02/2013 as 00:00 HMG; e d) 27/02/2013 as 12:00 HMG.



4.2 Caracterização dos eventos de ressurgência costeira

Estão apresentados na Tabela 4 a média, o desvio-padrão e o valor mínimo da TSM, bem como as médias das componentes zonal e meridional do transporte de Ekman e da camada de Ekman para cada um dos eventos de ressurgência identificados.

Os eventos mais frios ocorreram em setembro (final de inverno e início de primavera), com TSM média de 14,15°C a 14,62°C e valores mínimos abaixo de 13°C. As componentes zonais e longitudinais do transporte de Ekman, com exceção de um único evento em setembro, são, respectivamente, positivas (em direção ao largo) e negativas (em direção ao sul). Isto significa

Tabela 4 – Médias, Desvios Padrões (DP) e mínimos (MIN) da TSM (°C) e Média das componentes zonal e meridional do Transporte de Ekman e da camada de Ekman durante cada um dos eventos de ressurgência entre março de 2012 a fevereiro de 2013 na região de Cabo Frio-RJ.

EVENTOS DE RESSURGÊNCIA		TSM			TRANSPORTE DE EKMAN		CAMADA DE EKMAN
		(°C)			$(m^2 \cdot s^{-1})$		(m)
MÊS	DURAÇÃO (h)	MÉDIA	DP	MÍN	MÉDIA M_x	MÉDIA M_y	MÉDIA
Mar/12	72	15,79	0,91	14,74	0,835	-0,795	48
Abr/12	37	16,77	0,84	15,53	0,634	-0,734	42
Mai/12	120	16,47	0,68	14,90	0,701	-0,796	47
Ago/12	362	15,87	1,18	12,74	0,903	-1,332	57
Set/12	102	14,15	1,14	12,77	0,181	-0,192	24
Set/12	133	14,22	0,55	13,31	0,279	-0,257	28
Set/12	57	14,62	0,93	13,82	-0,088	0,148	34
Out/12	233	15,17	0,70	13,84	0,430	-0,511	37
Out/12	113	14,95	0,88	13,78	0,076	-0,126	23
Nov/12	111	15,30	1,35	13,80	1,488	-1,740	65
Dez/12	179	15,79	2,32	12,85	1,060	-1,163	55
Dez/12	49	16,05	0,67	15,22	0,922	-1,274	56
Dez/12	45	17,65	0,52	16,59	1,362	-1,355	62
Dez/12	47	16,98	0,52	16,40	1,492	-1,739	64
Jan/13	62	16,86	0,45	16,27	1,854	-2,000	68
Fev/13	393	15,89	0,78	14,63	0,803	-1,329	58

que o transporte zonal é para leste e o meridional é para sul, resultando em um vetor transporte de Ekman no terceiro quadrante geográfico (SE). Além disso, estas componentes têm módulos cujos valores implicam em ângulos próximos de 135°,

portanto, com direção sudeste. Também observa-se que os transportes meridionais são mais intensos do que os zonais, estando associados ao fato de as tensões de cisalhamento dos ventos zonais serem maiores que as meridionais. A boia se

encontra em uma posição na qual a direção zonal é praticamente paralela à costa, de modo que o transporte meridional é o transporte *offshore*. Por exemplo, para o terceiro evento de setembro (início da primavera) as intensidades médias do transporte zonal (0, 331) e meridional (-0,271), implicam um vetor cuja direção é 129° (sudeste). Como os ventos nordestes têm direção 45° , os transportes de Ekman associados têm direção 135° , sendo esta uma característica típica dos eventos de ressurgência em Cabo Frio (Figura 8).

As maiores camadas de Ekman estão associadas aos transportes de Ekman mais intensos, realçando a dependência que



Figura 8 – O vento nordeste (45°), que foi o mais frequente, com o transporte de Ekman associado (135°).

ambas têm do vento. Pode-se ver na Tabela 4 que somente em cinco dos dezesseis eventos a camada de Ekman não excedeu o valor da profundidade local (45 m), onde a boia estava fundeada. Tais valores excessivos expressam o potencial do vento em levantar uma camada de Ekman dessa magnitude, além de significar que a ACAS está presente em toda a coluna d'água, fundindo, assim, as camadas de Ekman de superfície e de fundo. Este preenchimento total pode ocorrer

quando a termoclina alcança a superfície e torna-se uma frente térmica superficial, ocorrendo, então, águas mais frias em direção à costa, o que é típico da plataforma média, segundo Castro (1996).

Os eventos mais frios (menor média e/ou menor mínimo) foram relativamente mais duradouros, com períodos entre 100 e 400 horas (4 a 16 dias). A exceção foi o terceiro evento de setembro com cerca de 57 horas ($\sim 2,4$ dias). Este grau térmico da ressurgência pode ser intensificado à medida que porções mais frias da ACAS, com percentuais de ocorrência maiores, adentram a plataforma continental. É o que ocorre quando uma água de $12,74^\circ\text{C}$ alcança a superfície, já que seu valor está próximo da temperatura do índice termohalino da ACAS proposto neste trabalho, que é 12°C , tendo, assim, quase 100% da água presente na borda da plataforma. Sugere-se, portanto, que as porções mais frias demandam mais tempo para alcançar a superfície.

Exceções podem ocorrer na primavera e no verão porque um evento de ressurgência ocorre logo após outro, sendo o caso supracitado de 57 horas, que iniciou em 24/09 com três dias de diferença para o fim do evento anterior. Nestes cenários, a ACAS fica mais próxima da costa e com uma memória do evento anterior, de modo que este novo evento tem menor tempo de resposta, 15 h conforme a Tabela 3, com águas de temperatura mínima ($13,82^\circ\text{C}$) na superfície. Observe que foi $13,32^\circ\text{C}$ no evento anterior.

4.3 Variações sazonais da ressurgência costeira

A maioria dos eventos de ressurgência ocorreram na primavera e no verão (Tabela 3), o que já é esperado pelo fato de a ACAS em média estar mais rasa e mais próxima da costa, conforme já discutido. Ocorreram dezesseis eventos de ressurgência entre março



de 2012 e fevereiro de 2013, sendo seis no verão, cinco na primavera, dois no outono e três no inverno.

As médias e desvios-padrão da TSM, do vento, dos transportes de Ekman zonal e meridional e da espessura da camada de Ekman estão apresentadas na Tabela 5. A média da TSM foi mínima na primavera (18,15°C), refletindo os cinco eventos de ressurgência que ocorreram, bem como os eventos mais frios e de maior tempo de permanência deste período. As médias do verão (19,92°C) e do inverno (19,83°C) foram semelhantes, refletindo a diminuição da irradiação solar e os três eventos relativamente mais frios que ocorreram na estação fria. Por outro lado, na estação quente, apesar do aumento da irradiação solar, a maior ocorrência de eventos (6) de ressurgência implicou uma média da TSM praticamente igual à do

inverno. A média do outono (22,65°C) reflete uma diminuição da irradiação do verão para o outono, bem como a frequência mínima de eventos. Assim, a variação sazonal da TSM, com diminuição do verão para o inverno, é intensamente modificada pela frequência dos eventos de ressurgência, principalmente na primavera e no verão. Portanto, há uma relação inversa entre a média da TSM e a frequência da ressurgência, o que também foi observado por Ribeiro (2010). A frequência de eventos no verão (6) foi maior do que na primavera (5), tendo estas duas estações uma duração total dos eventos praticamente iguais, 593 h e 598 h respectivamente. Entretanto, os eventos de primavera foram mais frios. Assim, conclui-se que a média sazonal da TSM varia inversamente também com a duração e a intensidade do evento (o quão fria a água esteve).

Tabela 5 – Médias para cada estação do ano, da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), das componentes zonal (U) e meridional (V) do vento e direção média obtida com essas componentes, das componentes zonal (M_x) e meridional (M_y) do transporte de Ekman com as respectivas direções e espessuras da camada de Ekman (D_E).

Estações Do Ano	TSM (°C)	U ($m \cdot s^{-1}$)	V ($m \cdot s^{-1}$)	DIR. MÉDIA (°)	M_x ($m^2 \cdot s^{-1}$)	M_y ($m^2 \cdot s^{-1}$)	DIR. MÉDIA (°)	D_E (m)
Verão	19,92	-4,3	-2,72	57,7	0,584	-0,818	145	45
Outono	22,65	-2,13	-0,77	70,1	0,133	-0,293	157	34
Inverno	19,83	-3,23	-2,21	57,6	0,472	-0,626	143	46
Primavera	18,15	-3,45	-1,37	68	0,395	-0,724	156	44

A média de verão assemelha-se ao valor climatológico de Rezende (2003), obtida com 14 anos de dados de CTD e garrafas, para a PCSE (Figura 9), onde podem ser observadas temperaturas inferiores a 20°C próximas da costa, na região de Cabo Frio. Esta média já indica a influência dos processos de

ressurgência costeira na TSM, já que seções verticais de temperatura indicam a isoterma de 20°C com configuração ascendente e alcançando a superfície na plataforma continental, com a ACAS contribuindo percentualmente para a água superficial (Castro, 1996; Coelho, 1997; Rezende, 2003; Medeiros, 2020).

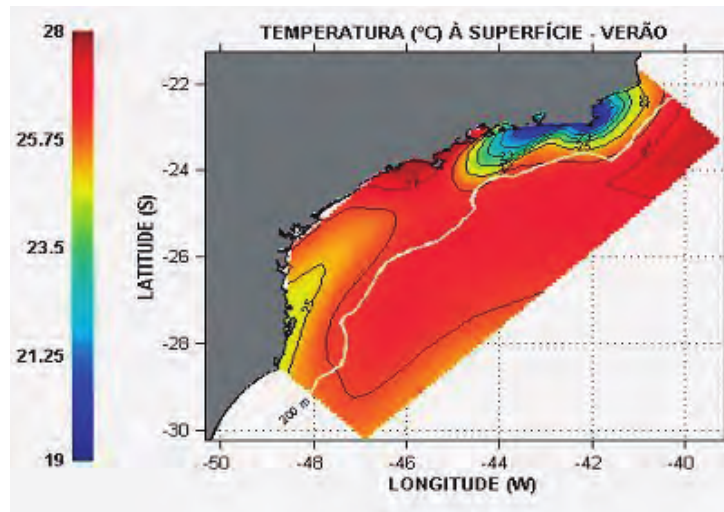


Figura 9 – Climatologia de verão da TSM na PCSE, obtida com 14 anos de dados de CTD e de Garrafas oceanográficas. Fonte: Rezende (2003).

Os valores médios das componentes do transporte de Ekman foram maiores no verão, seguidos dos valores da primavera, indicando também, a maior frequência dos eventos de ressurgência nestas estações. A média das componentes meridionais, que ocorrem em direção ao largo no local de estudo, foram sempre maiores que as zonais, indicando a influência da componente do vento paralela à costa. O módulo do transporte de Ekman no verão ($1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) é semelhante aos valores climatológicos obtidos com dados de Scaterômetro na região de Cabo Frio por Castelão e Barth (2006).

4.4 Relação entre as séries temporais do vento, da TSM, do Transporte de Ekman e da Camada de Ekman durante os eventos de ressurgência

Os ventos do primeiro quadrante (NE) implicam transportes de Ekman cujas componentes zonais (Leste-Oeste) e meridionais (Norte-Sul) são, respectivamente, positivas (para Leste) e negativas (para Sul). Vê-se que essas componentes apresentaram estes sinais durante os eventos de ressurgência (Figura 10).

Durante os eventos de ressurgência, à medida que o vento fica mais intenso, há uma intensificação do transporte de Ekman (a componente zonal fica mais positiva, e a meridional, mais negativa) e da camada de Ekman, com a água ficando mais fria. Esses resultados indicam a dependência que o fenômeno da ressurgência em relação à intensidade do vento. Cabe ressaltar que as expressões analíticas utilizadas nos cálculos do transporte de Ekman e da espessura da camada de Ekman dependem diretamente da velocidade do vento para uma determinada latitude. As Figuras 10 e 11 ilustram este processo para o evento mais frio, que ocorreu entre 6 e 10 de setembro de 2012. Os transportes de Ekman meridionais (que dependem do vento zonal) foram, em geral, maiores do que os zonais (que dependem do vento meridional), conforme concluído, também, através das médias obtidas na Tabela 5. Isso está associado ao fato de ocorrerem ventos mais frequentes entre 45° e 65° , cujas componentes zonais são maiores que as meridionais, implicando maior transporte de volume no sentido 'offshore'.



A espessura da camada de Ekman foi menor tanto no início quanto no final do evento de ressurgência, atingindo 40 metros quando a velocidade do vento manteve-se em valores altos e a TSM estabilizou-se em 13°C.

Destaca-se, também, na Figura 10a permanência da temperatura inferior a 15° C por cerca de 3 dias, valor este que é considerado estratégico para as operações do SAR, já que o tempo de sobrevivência nestas águas é curto (Junger, 2009).

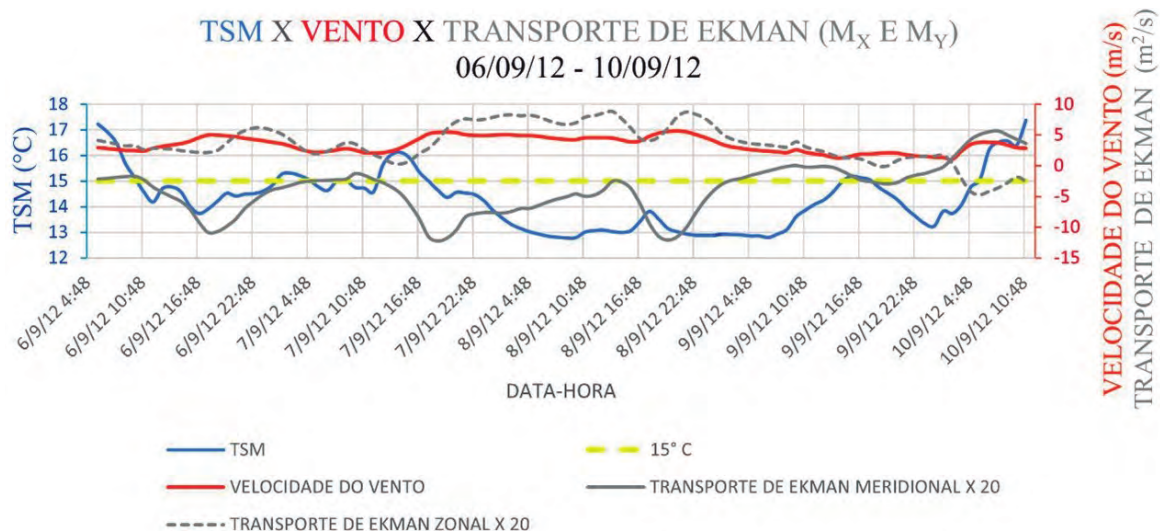


Figura 10 – Série temporal da TSM, da velocidade do vento e das componentes zonal (M_x) e meridional (M_y) do transporte de Ekman, para o evento que ocorreu no final do inverno (de 06/09 a 10/09). O transporte de Ekman por unidade de distância está multiplicado por 20, a fim de ser realçado junto com a velocidade do vento.

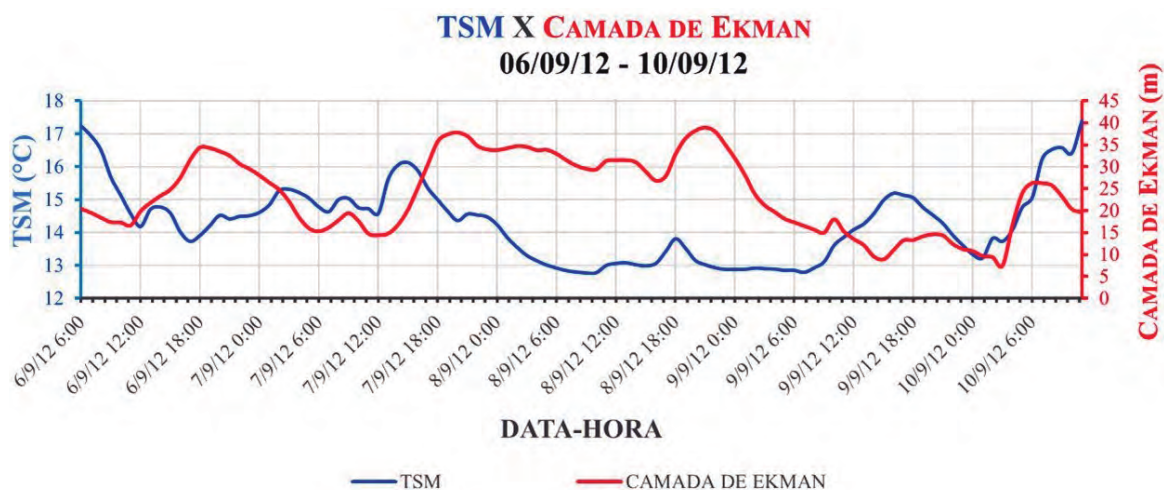


Figura 11 – Série temporal da TSM e da camada de Ekman, para o evento que ocorreu no final do inverno (de 06/09 a 10/09).

Na Figura 11 pode-se observar que às menores temperaturas estiveram associadas as maiores espessuras das camadas de Ekman e, conseqüentemente, aos ventos mais intensos. Isso ocorre porque o cálculo da camada de Ekman dependeu somente do vento na latitude da boia.

Na Figura 12, estão apresentadas as curvas da TSM e da camada de Ekman para o segundo maior tempo de permanência (~15 d), que ocorreu em agosto de 2012.

Neste evento, vê-se que a espessura da camada de Ekman excedeu a profundidade local (45 m) em praticamente todo o período, evidenciando os ventos relativamente mais intensos em relação ao evento de setembro (Figura 10). Isto mostra o potencial do vento em levantar uma camada de Ekman maior que a profundidade local e que pode ter havido uma fusão das camadas de Ekman de superfície e de fundo, estando toda a coluna d'água preenchida pela ACAS.

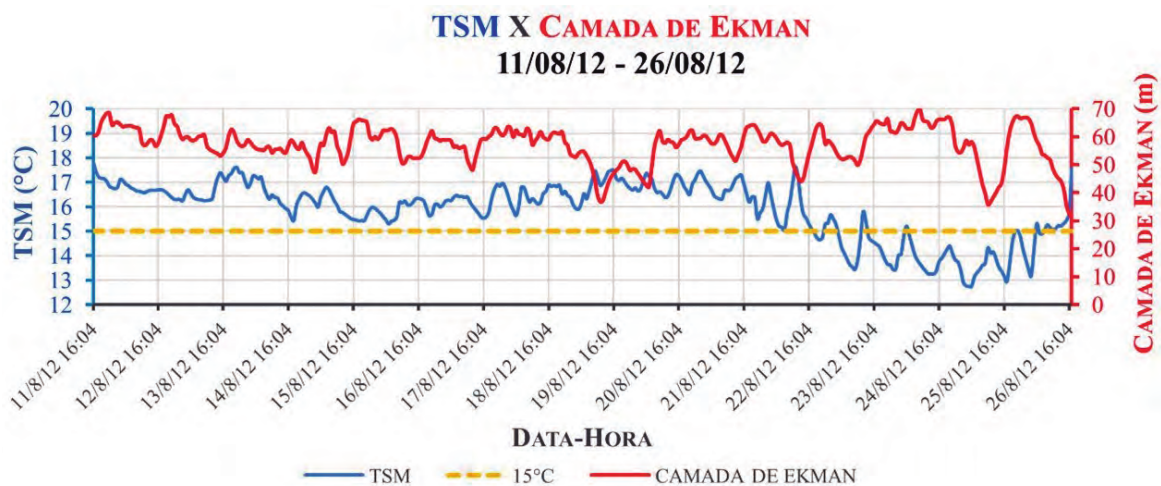


Figura 12 – Série temporal da TSM e da espessura da camada de Ekman durante o evento de ressurgência que ocorreu entre 11/08/2012 e 27/08/2012. A linha amarela pontilhada indica a temperatura de 15°C.

Uma pergunta que se levanta é: por que o evento que ocorreu de 06/09/12 a 10/09/12 teve um tempo de permanência menor que o de 11/08/12 a 27/08/12, mas, por outro lado, apresentou TSM mais fria em todo o período e com um mínimo praticamente igual (~12,8 °C) ao evento de longa duração? Em agosto, apesar de um vento mais intenso, demorou cerca de 12 dias para que a TSM resfriasse até 15 °C, permanecendo, depois, abaixo deste valor durante 4 dias. Já no evento de início de setembro, a temperatura esteve abaixo de 15 °C em

praticamente todo o período de quase 5 dias. Este evento mais frio não está associado somente à posição em que a ACAS se encontra quando o vento entra no primeiro quadrante, mas também ao percentual de ACAS que se encontra nesta posição, a partir de onde se inicia um processo de ressurgência, com o transporte de Ekman afastando a água costeira em direção ao largo e a ACAS se aproximando da costa pelo fundo, para posteriormente ressurgir devido à divergência costeira. Depreende-se, que no evento de agosto, a ACAS estava mais distante e,



assim, demandou mais tempo não só para a TSM resfriar até 18°C, definindo o tempo de resposta longo (87 h), mas também para que a porção com temperaturas entre 15°C e o valor mínimo 12,8°C (de maior percentual relativo ao índice termohalino) alcançasse a posição da boia. Já na primavera, este período foi menor pelo fato de a ACAS já estar mais próxima da costa e com percentuais de ocorrência maiores.

O evento de fevereiro de 2013 (Figura 13), apesar de ter tido o maior tempo de permanência da ressurgência (~16 d), praticamente não apresentou temperaturas inferiores a 15°C. A curva da camada de Ekman deste evento foi semelhante às do início de setembro (Figura

10), refletindo a similaridade dos ventos. Por qual motivo, então, os eventos de agosto de 2012 e o de fevereiro, apesar de seus tempos de permanência serem praticamente iguais, não tiveram a mesma intensidade térmica? A resposta encontra-se nos processos físicos que controlam a quantidade de ACAS que se encontra na plataforma. Além do processo de ressurgência costeira em escala sazonal e sinótica, a ACAS também pode ser injetada na quebra da plataforma continental pelos meandramentos ciclônicos da Corrente do Brasil (Campos *et al.*, 2000), podendo as temperaturas inferiores a 14-15°C estarem associadas a esta combinação de processos (Carvalho, 2019; Medeiros, 2020).

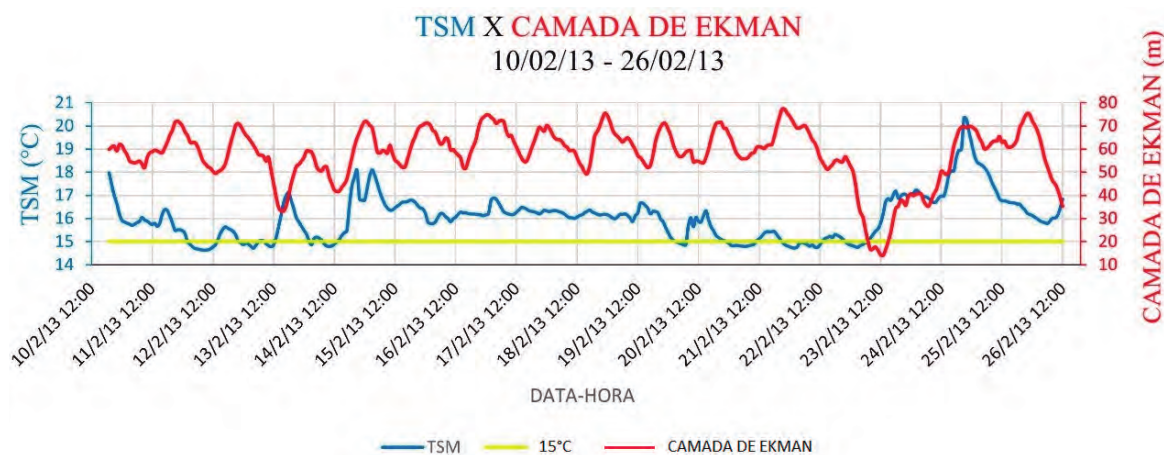


Figura 13 - Série temporal da TSM e da espessura da camada de Ekman durante o evento de ressurgência que ocorreu entre 10/02/2013 e 26/02/2013. A linha amarela pontilhada indica a temperatura de 15°C.

5. CONCLUSÕES

- O Tempo de Permanência da ressurgência costeira deve-se à duração dos ventos NE/E (35° - 90°), com as frentes frias frequentemente interrompendo os eventos de ressurgência;
- Os ventos mais frequentes estiveram distribuídos em três classes modais: 17%, de

- 35° a 45°; 15%, de 45° a 55°; e 11%, de 55° a 65°. A direção média obtida com as componentes do vento foi 62°, estando dentro desta última classe modal;
- Por ser um valor próximo da moda, então, indica também um dos ventos típicos que propiciaram a ressurgência;
- Os maiores Tempos de Resposta, isto é, os tempos decorridos para que a TSM



resfrie até 18°C, desde a entrada do vento no primeiro quadrante, estão associados a uma posição da ACAS mais afastada da costa e em regiões mais profundas. Esses tempos ocorrem mais frequentemente no inverno, como aconteceu no evento de agosto de 2012 (87 h);

- Nos eventos de ressurgência, as componentes zonais e meridionais do transporte de Ekman tiveram sinais positivos (para leste) e negativos (para sul), respectivamente, implicando transporte de Ekman para Sudoeste. As componentes meridionais (*offshore* no local da boia) foram maiores do que as zonais, isto porque as componentes zonais do vento foram iguais ou maiores do que as meridionais, devido aos ventos mais frequentes com direções de 45° a 65°;

- A camada de Ekman, em dez dos dezesseis eventos, excedeu o valor da profundidade local (45 m), indicando o potencial do vento em levantar camadas de Ekman de tais magnitudes, além de, provavelmente,

indicar o preenchimento de toda a coluna d'água pela ACAS;

- A variação sazonal da TSM, com aumento do inverno para o verão, é modificada pela frequência, duração e intensidade térmica dos eventos de ressurgência, principalmente na primavera e no verão. A média sazonal variou inversamente com estes fatores, sendo mínima na primavera e máxima no outono.

- A TSM média de verão (19,92°C) assemelha-se ao valor climatológico de Rezende (2003) obtido para a região de Cabo Frio;

- Durante os eventos de ressurgência, à medida que o vento fica mais intenso, há uma intensificação do transporte de Ekman (a componente zonal fica mais positiva e a meridional mais negativa) e da camada de Ekman, com a água ficando mais fria; e

- A intensidade do evento de ressurgência não depende somente da duração e da posição da ACAS quando o vento entra no primeiro quadrante, mas também do percentual de ACAS que se encontra disponível na plataforma continental.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLARD, P. Anomalies dans les températures de l'eau de mer observées au Cabo Frio au Brésil. *Bull. Inf. Com. cent. Océanogr. Étude Côtes*, 7(2), p. 58-63, 1955.

AMOR, C.C. *Intrusões da Água Central do Atlântico Sul sobre a plataforma continental situada entre a Ilha de São Sebastião (SP) e o Cabo de São Tomé (RJ)*. 2004. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

BERTOLDI, N. I. *Variabilidade da Temperatura da Superfície do Mar na região do Cabo Frio - RJ Utilizando dados in situ*. Monografia (Graduação em Oceanografia Bacharelado), Universidade do Paraná, Pontal do Paraná. 2019.

BLUESTEIN, H.B. 1992. *Synoptic – Dynamic Meteorology in Midlatitudes*. Vol 1. Oxford University Press.

CAMPOS, E.J.D.; VELHOTE, D.; SILVEIRA, I.C.A. Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. *Geophys. Res. Lett.*, vol 27, n. 6, p. 751-754, 2000.



CANDELLA, R. N. Correlação temperatura X salinidade e variação sazonal da Água Central do Atlântico Sul no quadrado de Marsden 376. *Pesquisa Naval*. Rio de Janeiro, 1999. v. 12., p. 35-39.

CARVALHO, R. A. DE. *Intrusão da Água Tropical na Plataforma Continental entre Paranaguá (PR) e Santos (SP)*. Trabalho de conclusão de curso de aperfeiçoamento em hidrografia para oficiais. Diretoria de Hidrografia e Navegação. 2019.

CASTELÃO, R.M; BARTH, J.A. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (L03602), doi:10.1029/2005GL025182, 2006.

CASTRO, B. M. *Correntes e massas de água da Plataforma Continental Norte de São Paulo*. 1996. Tese de Livre-Docência, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CASTRO, B. M.; MIRANDA, L. B. *Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S*. *The Sea*. Oxford (UK): John Wiley & Sons, 1998. v. 11, n. 1, p. 209-251 .

CASTRO, B.M.; PEREIRA, A. F.; CAROLI, A.; FOLONI NETO, H.; PASCHOAL, G. C. A.; SILVEIRA, I. C. A.; AMOR, C. C. *Correntes e Massas de Água na Plataforma Continental*. In: Falcão, A.P.C.; Curbelo-Fernandez, M.P. (Org.). Série Habitats. 1ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 2, p. 189-252, 2015.

COELHO, A. L. *Massas de água e circulação no canal de São Sebastião (SP)*. Dissertação de mestrado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 1997.

COELHO, A. L. *Resposta da Plataforma Continental Sudeste a ventos sazonais e sinóticos de verão: estudos numéricos*. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 2007.

COELHO, A. L. *Intrusão da ACAS na região costeira adjacente a Baía de Sepetiba*. *Diretoria de Hidrografia e Navegação*. Anais hidrográficos – DH3 – LXVII, 109 – 116, 2010.

DEFANT, A. 1961. *Physical Oceanography*. New York: MacMillan V. 1.

ECMWF. ERA5. Disponível em: < <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> >. Acesso em 22 de março de 2021.

EKMANN, V.W. 1905. On the influence of the Earth's rotation on ocean-currents. *Arkiv för Matematik Astronomi och Fysik*. 2(11): 1-53.

ELIAS, L.M.C. *Variabilidade Interanual da Ressurgência em Cabo Frio – RJ*. Dissertação de mestrado, UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2009.

EMÍLSON, I., 1961: "The Shelf and Coastal Waters Off Southern Brazil". *Bolm Inst. Oceanogr.*, XI(2), 101-112.



GAMMA DE ALMEIDA, E; TANAKA K., 1981: “Acompanhamento de Fenômenos Oceanográficos da Costa Sul do Brasil por Sensoriamento Remoto à Distância Orbital”. Publicação do Instituto de Pesquisas Espaciais, 1975-RPE/280, 34 pp.

GILLIAM, R. C., RAMAN, S.; NIYOGI, D. D. S. Observational and numerical study on the influence of large-scale flow directions and coastline shape on sea-breeze evolution. *Boundary. Layer Meteorology.*, , 2004. v. 111, p. 275-300.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., BIAVATI, G., HORÁNYI, A., MUÑOZ SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., ROZUM, I., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018): ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S)*. Climate Data Store (CDS).

IKEDA, Y., L. B. DE MIRANDA & N. J. Rock, 1974: “Observations on Stages of Upwelling in the Region of Cabo Frio (Brazil) as Conducted by Continuous Surface Temperature and Salinity Measurements”. *Bolm Inst. Oceanogr.*, 23, 33-46.

IKEDA, Y., 1976: “Variações em Escala Média da Temperatura e da Salinidade do Mar na Região Entre a Baía de Guanabara e Cabo Frio (17/08 a 26/08/1971)”. Dissertação de mestrado publicada no Bolm do Inst. Oceanogr., 25, 221-280.

JUNGER, S. M. Tempo Estimado de Sobrevivência no Mar e Planejamento de Missões SAR. *Revista Passadiço*, ed. 29, 2009.

KUTSUWADA. K., 1998. Impact of wind/wind-stress field in the North Pacific constructed by ADEOS/NSCAT data. *Int. J. Oceanography*, 54 443-456.

LARGE, W. G., S. G. Yeager, 2004. Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea ice models: The data sets and climatologies. *NCAR Technical Report*, TN-460+STR, 105pp.

MACHEL, H., A. KAPALA e H. FLOHN. Behaviour of the Centres of Action above the Atlantic since 1881. Part I: *Characteristics of seasonal and interannual variability*. *Int. J. Climatology*, 18, 1-22, 1998.

MANN, K.H.; LAZIER, J.R.N. *Dynamics of marine ecosystems: Biological – Physical Interactions in the Oceans*. Blackwell Scientific Publications, 1991. 466 p.

MEDEIROS, L.R.P. *Massas de Água entre Ubatuba (SP) e Baía de Guanabara (RJ): variações sinóticas, sazonais e de mesoescala*. Trabalho de conclusão de curso de aperfeiçoamento em hidrografia para oficiais. Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino (CIAARA). p. 87, 2020.

MUEHE, D. Sedimentology of a high energy coastal environment between Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil. *Anual. Acad. Bras. Ciênc.*, 51(3): p. 473-481, 1979.



PASSOS E. N. *Variação sazonal da Água Central do Atlântico Sul na Plataforma Continental Sudeste Brasileira ao largo do Estado do Rio de Janeiro*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.

POND. S. AND PICKARD. G. L. 1983 *Introductory dynamical Oceanography*. Second edition. (New York: Pergamon Press).

REZENDE, J. H. M. *Intrusões da Água Central do Atlântico Sul na plataforma continental sudeste durante o verão*. Tese de doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. 2003.

RIBEIRO, F.N.D. *Padrões das circulações atmosférica e oceânica na região de ressurgência de Cabo Frio*. Tese de doutorado. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. 2010.

RODRIGUES, R. F., 1977: *Evolução da Massa D'água Durante a Ressurgência em Cabo Frio*. Publicação do Inst. de Pesq. da Marinha, 115, 31 pp.

RODRIGUES, R. R.; LORENZZETTI, J. A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. *Continental Shelf Res.*, v. 21, p. 371-394, 2001.

RODRIGUES, R.R, LORENZZETTI, J.A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeastern Brazilian coastal upwelling. *Cont. Shelf. Res.* 21, p. 371-394, 2001.

SILVA, G. L.; DOURADO, M. S.; CANDELLA, R. N. Estudo Preliminar da Climatologia da Ressurgência na Região de Cabo Frio. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006*.

SILVA, M.P., 1995. *Caracterização Físico-Química das Massas de Água da Bacia de Santos durante o Projeto COROAS. Verão e Inverno de 1993*. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 135 p.

SILVEIRA, I.C.A; NETO, H.F.; COSTA,T.P; SCHMIDT, A.C.K; PEREIRA, A.F; CASTRO, B.M; SOUTELINO, R.F; MATHESON, G.S.G. *Caracterização da Oceanografia Física do Talude Continental e Região oceânica da Bacia de Campos*. In: Falcão, A.P.C.; Curbelo-Fernandez, M.P. (Org.). *Série Habitats*. 1ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 1, p. 135-189, 2015.

SOUZA, A.T.M. *Resposta do Fitoplâncton a um evento de Ressurgência em uma Estação Fixa, na Plataforma Interna de Cabo Frio-RJ*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, Bahia, Ba, 2006.

TANAKA, K. *Análise de série temporal de 10 Anos: ressurgência em Cabo Frio*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-3812 RPE/502, 1986.



TORRES JÚNIOR, A. R. *Resposta da ressurgência costeira de Cabo Frio a forçantes locais*, 1995 XIX 143 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Oceânica, 1995) Tese (Mestrado) - Universidade Federal Do Rio de Janeiro, COPPE.

VALENTIN, J. L.; ANDRÉ, D. L.; JACOB, S. A.; Hydrobiology in the Cabo Frio (Brazil) upwelling: two dimensional structure and variability during a wind cycle. *Continent. Shelf Res.* v. 7, p. 77-88, 1987.

VALENTIN, J. L.; KEMPF, M. Some characteristics of the Cabo Frio upwelling. *Coast. Upwelling Ecosyst. Analysis Newsl.*, v. 6, p. 18-19, 1977.

