

# O efeito da ressurgência costeira de Cabo Frio

## na Propagação Acústica Submarina



*Gabriel Codato A. Silva*  
Estagiário do Grupo de Sensoriamento  
Remoto do IEAPM

*Leandro Calado*  
Encarregado do Grupo de Sensoriamento Remoto do IEAPM  
Doutor em Oceanografia Física

*Wandrey B. Watanabe*  
Doutorando na Universidade de São Paulo

*Nélson Martins*  
Doutorando na Universidade do Algarve, Portugal

*Arthur E. A. Ramos*  
Oceanógrafo no Cento de Hidrografia da Marinha

**A** região oceânica ao largo de Cabo Frio constitui um domínio oceanográfico peculiar, quando comparado ao padrão de configuração da costa brasileira. Nesta região ocorre uma mudança brusca na orientação da linha de costa, onde a quebra da plataforma continental torna-se mais próxima do continente. O resultado é um sistema complexo onde as dinâmicas de circulação costeira e oceânica interagem fortemente entre si, desencadeando uma série de processos físicos referentes à interface oceano-plataforma (CALADO *et al.*, 2008).

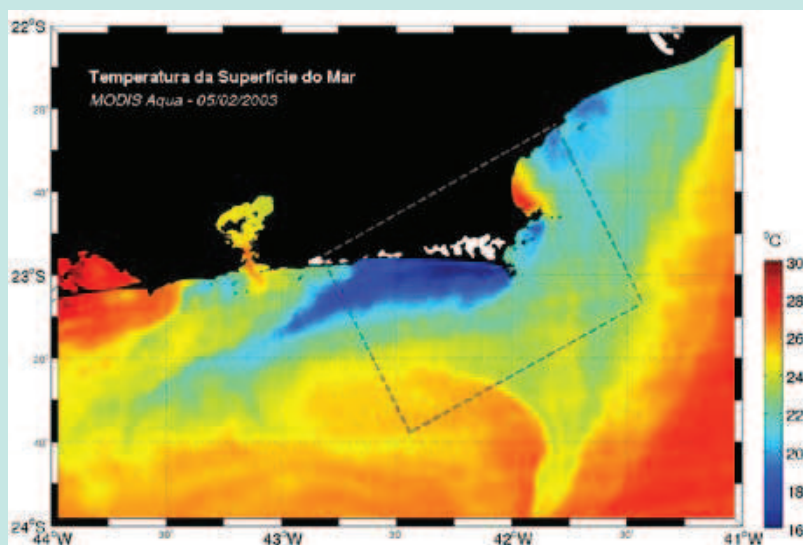
Dentre os principais processos, destaca-se a ocorrência da ressurgência costeira. Este fenômeno resulta da combinação entre a própria configuração da costa de Cabo Frio e a persistência de ventos do quadrante nordeste – que ao fluir por vários dias consecutivos na mesma direção, acarreta no afastamento das águas superficiais costeiras, através da dinâmica de Ekman. Esse mecanismo promove o afloramento da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), que ascende além da quebra da plataforma continental com temperaturas abaixo de 18°C, podendo aflorar em superfície próximo a costa (CALADO *et al.*, 2010). Em contrapartida, a camada superficial que abrange essa região do talude é geralmente ocupada pela Corrente do Brasil (CB), composta por águas com temperaturas mais elevadas – em torno de 25°C a 27°C durante o verão e de 22°C a 24°C durante o inverno. Nesse processo

de interação entre as águas da CB e a ressurgência pode ser desenvolvido um gradiente térmico de até 10°C, conforme observado na Figura 1.

Os gradientes de temperatura podem impactar a propagação do som no mar e, conseqüentemente, o alcance dos equipamentos sonares. A Figura 2 ilustra uma possível condição em que gradientes de temperatura dificultam ou até inviabilizam a localização de alvos.

A utilização do sonar em operações navais militares passou a ter maior importância durante a Segunda Guerra Mundial, onde as técnicas acústicas de detecção de alvos permitiam a localização de submarinos, principal arma de ataque aos navios. Desde então, o uso do sonar ativo e passivo tornou-se um instrumento fundamental no emprego do Poder Naval (AGUIAR, 2005). Junto ao avanço tecnológico destes instrumentos, veio a necessidade de se relacionar dados meteorológicos e oceanográficos com o ambiente acústico, no intuito de viabilizar uma boa previsão de desempenho sonar (XAVIER, 2005).

De fato, a variabilidade da estrutura de temperatura e salinidade do oceano provoca efeitos significativos no campo acústico, causando incertezas no seu prognóstico. Dessa forma, a previsão e o monitoramento sinótico dos processos oceanográficos são fundamentais para subsidiar uma previsão acústica acurada.



**Figura 1:** Imagem de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) evidenciando o fenômeno da ressurgência costeira em Cabo Frio.



A modelagem numérica hidrodinâmica é uma das ferramentas que traduz de forma espaço-temporal a estrutura tridimensional termohalina e dinâmica do movimento do oceano, propiciando a investigação de fenômenos físicos que interagem com o ambiente acústico. O estudo foi baseado nesta abordagem, onde um modelo numérico da ressurgência

costeira de Cabo Frio foi implementado como parâmetro de entrada em um modelo de propagação acústica, que simulou a transmissão dos sinais. O objetivo foi avaliar o desempenho dos sinais acústicos ao longo do gradiente térmico promovido pela ressurgência, buscando compreender as perdas na propagação acústica causadas por este fenômeno.

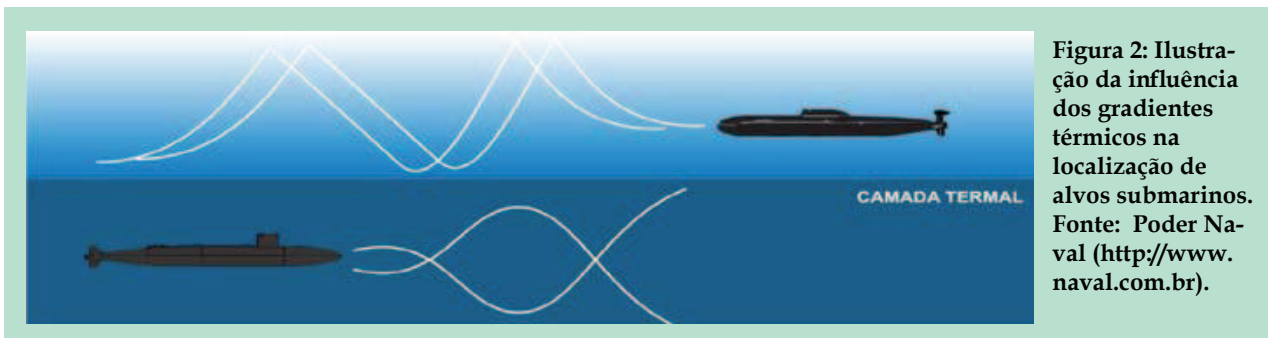


Figura 2: Ilustração da influência dos gradientes térmicos na localização de alvos submarinos. Fonte: Poder Naval (<http://www.naval.com.br>).

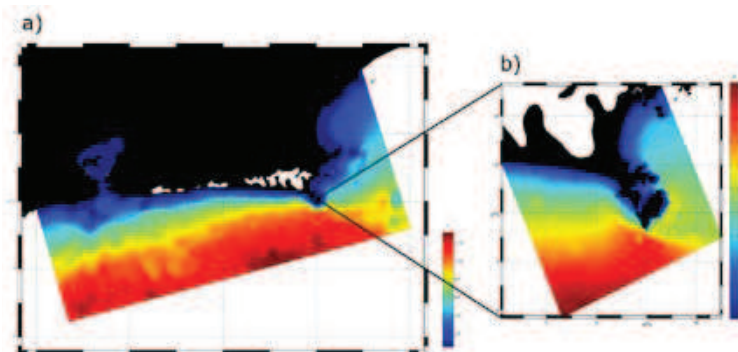
### Modelo Numérico Hidrodinâmico

O modelo numérico hidrodinâmico utilizado foi o Regional Ocean Modeling System – ROMS (SHCHEPETKIN & MCWILLIAMS, 2005), no qual foi empregada uma técnica conhecida como aninhamento (do inglês, nesting), que consiste em utilizar resultados de uma simulação numérica como forçantes iniciais ou como condição de contorno para outra simulação, com maior resolução espacial e temporal.

A simulação de menor resolução apresenta uma grade de resolução espacial de aproximadamente 1 km, com limites 22°S – 24°S de latitude e 44°W – 41°W de longitude – Figura 3 (a). Neste experimento, a única forçante utilizada foi a tensão de cisalhamento do vento, extraída do modelo global NCEP (National Centers for Environmental Predic-

tion), com resolução temporal de 6 horas. Já no experimento de maior resolução, além da tensão de cisalhamento do vento, também foi utilizada a forçante de maré, extraída do modelo global de previsão de maré TPXO (TOPEX/POSEIDON global tide model). Neste experimento, a grade possui limites 22,86°S-23,1°S de latitude e 42,19°W-42,89°W de longitude, e apresenta variação espacial que permite adensamento de resolução na região de maior interesse, portanto a resolução espacial varia entre 50 a 300m – Figura 3 (b). Ambos os experimentos tiveram como condição inicial de temperatura e salinidade os campos extraídos da climatologia de Boyer et al. (2005), e as simulações foram realizadas para o período de um mês (Janeiro/2001).

Figura 3: Ilustração do aninhamento com as respectivas grades batimétricas, onde (a) representa a grade de menor resolução, e (b) a grade de maior resolução espacial na região de Cabo Frio.



Dos resultados do modelo numérico, foram selecionados dois cenários distintos, sendo um deles representativo da ressurgência costeira – Figura 4 (a), e outro de uma situação onde a ressurgência não ocorria – Figura 4 (b). Os transectos observados nesta figura representam as seções termohalinas que foram convertidas em seções de velocidade do som, através do algoritmo da UNESCO (FOFONOFF & MILLARD, 1983). Estas seções foram utilizadas como base para a construção da estrutura de propagação sonora, posteriormente implementadas em um modelo acústico para se estudar a propagação dos sinais.

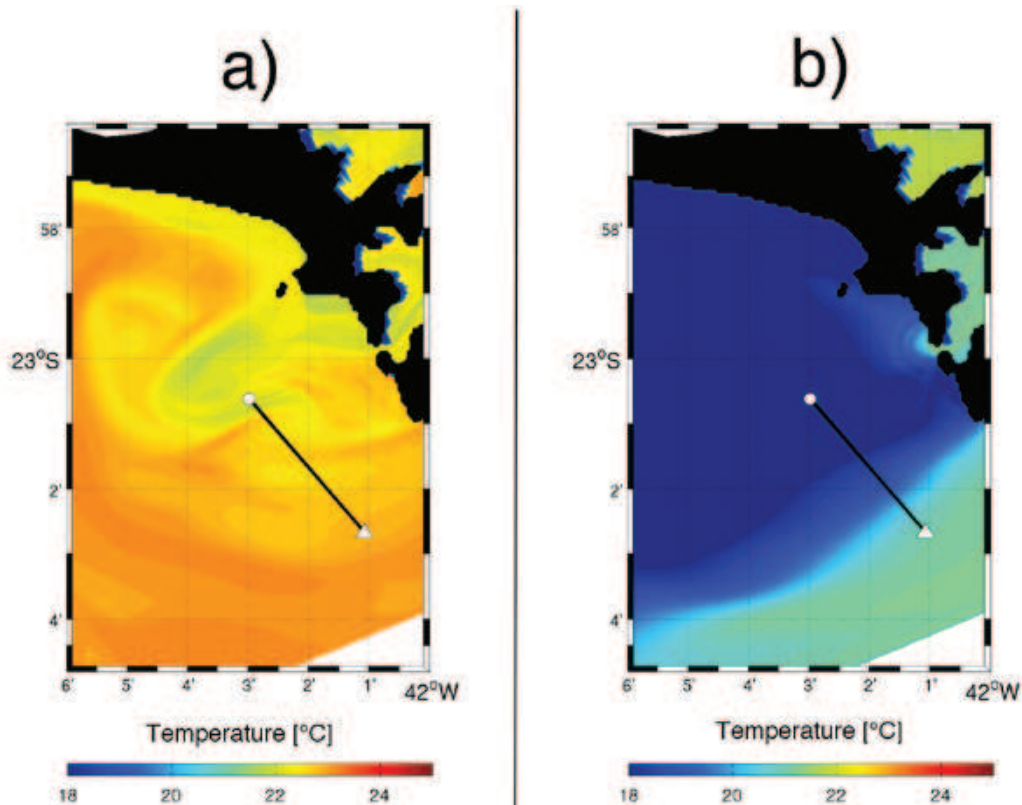


Figura 4: (a) Seção representativa de um cenário (a) com ressurgência e um (b) sem ressurgência. Os transectos representam as seções termohalinas utilizadas como entrada do modelo acústico, onde o triângulo é a posição da fonte sonora, e o círculo o receptor

### Modelo de Propagação Acústica

A propagação dos sinais acústicos foi realizada através do modelo acústico BELLHOP (PORTER & BUCKER, 1986), um eficiente programa de traçamento de feixes, desenvolvido em linguagem Fortran como parte do software Acoustic Toolbox. Este modelo foi projetado para executar o traçado bidimensional de raios acústicos em um determinado perfil de velocidade do som. No caso deste trabalho, a velocidade do som varia conforme distância e profundidade, e foi calculada com base no algoritmo da UNESCO (FOFONOFF & MILLARD, 1983).

A propagação dos feixes foi realizada a partir de 10 m de profundidade, com abertura angular de  $-45^\circ$  a  $45^\circ$ , e frequência de 1500 Hz. A velocidade do som nos sedimentos foi estabelecida como 1750 m/s, e a análise da atenuação dos sinais foi feita a partir do cálculo do parâmetro de Transmission Loss (TL).



## Resultados e Discussão

Os resultados numéricos conduzidos com o ROMS caracterizaram a ressurgência costeira de Cabo Frio de forma realística. A ressurgência gerada pelo modelo apresentou grande maturidade, fazendo com que águas de 18 °C chegassem até a superfície. Os ventos de nordeste agiam intensificando a ascensão das águas de fundo, o que também evidenciou a eficiência do modelo numérico em reproduzir o fenômeno.

Através da Figura 5, no mapa de temperatura da superfície do mar (TSM) próximo a costa, é possível identificar um evento de forte ressurgência costeira, referente ao dia 25 de Janeiro de 2001.

Já na Figura 6, é nitidamente reconhecido um evento onde a ascensão da água de fundo não ocorria, referente ao dia 05 de Janeiro 2001.

O resultado dos experimentos realizados com o BELLHOP mostrou que a pluma de ressurgência atua como uma barreira à propagação do som, visto que no cenário sem ressurgência um mesmo sinal acústico alcançou distâncias maiores. Ou seja, o primeiro experimento mostrou que quando não há pluma de ressurgência o sinal sonoro se propaga por mais de 4 km, enquanto que na ocorrência do fenômeno o sinal da fonte sonora é praticamente extinto a cerca de 2 km de distância (Figura 6).

Essa atenuação dos sinais é provocada pelo forte gradiente térmico, o qual acaba funcionando como um mecanismo de refração da onda sonora ao longo da sua trajetória. No caso de um sistema sonar ativo, onde um transdutor atua como fonte sonora e emite um sinal acústico cuja intensidade de pressão é SL (Source Level), o pulso sofre perdas na propagação (TL), de modo que o nível acústico que chega no alvo é  $SL - TL$ . Após atingir o alvo, parte desse sinal, definido como Refletividade do Alvo (TS - Target Strength) é refletido de volta para o receptor e neste trajeto acumula novas perdas (TL) (AGUIAR, 2005). Sendo assim, o nível de eco (EL) na face do transdutor, agora atuando como hidrofone é definido por:

$$EL = SL - 2TL + TS \dots (1)$$

Com base na equação acima (1), uma implicação prática do fenômeno observado neste trabalho seria a diminuição da probabilidade de detecção de um alvo posicionado além da frente térmica da ressurgência costeira, sendo que o nível de eco (EL) depende essencialmente das perdas na propagação.

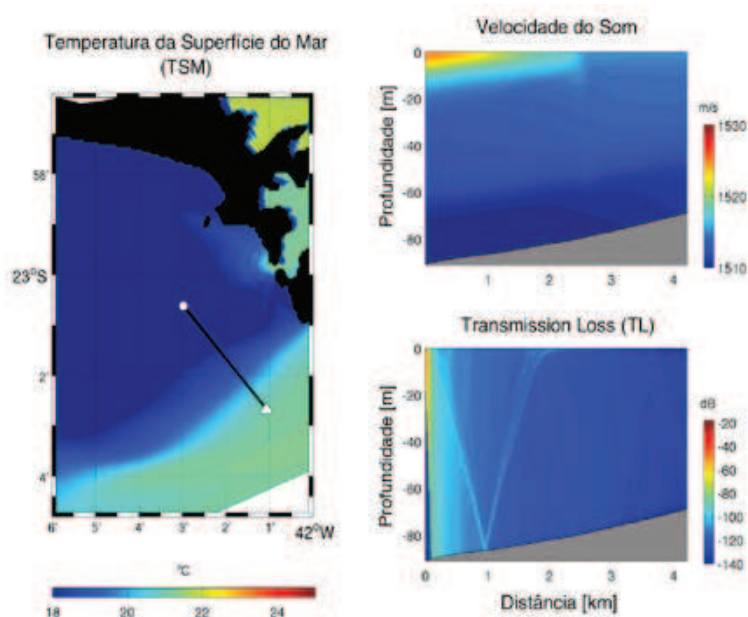


Figura 5: Seção vertical de atenuação do sinal acústico para o cenário com ressurgência.

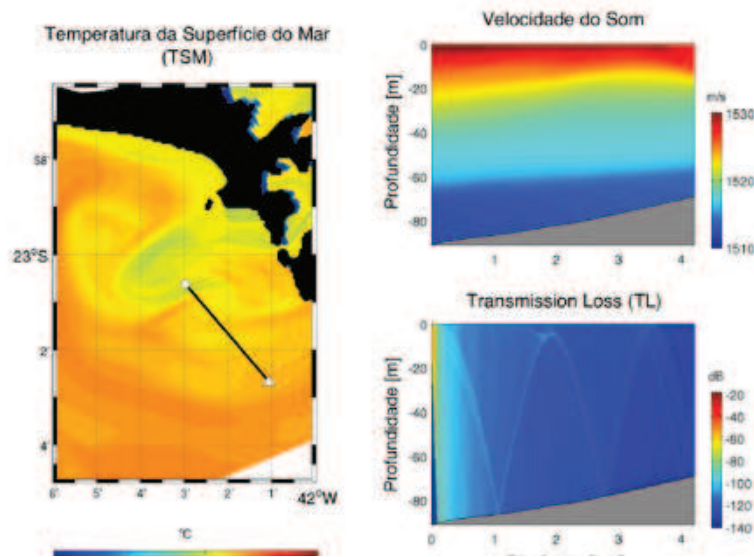


Figura 6: Seção vertical de atenuação do sinal acústico para o cenário sem ressurgência costeira.

## Conclusões

O modelo numérico possibilitou, com alta resolução espacial e temporal, uma reprodução sinótica do campo termohalino da ressurgência costeira de Cabo Frio. Esta ferramenta traz consigo a possibilidade de prever a variabilidade da estrutura termohalina do oceano, subsidiando os sistemas de previsão do ambiente acústico.

Os resultados do modelo acústico ilustram de forma qualitativa a influência das frentes de densidade na propagação de um sinal acústico.

Assim, foi possível perceber que a interação do processo de ressurgência costeira com o ambiente acústico pode impactar a propagação dos sinais sonoros de forma significativa, muito provavelmente prejudicando atividades práticas da acústica submarina, como por exemplo a detecção de alvos submarinos. Espera-se futuramente analisar este problema de forma quantitativa, no caso, determinando a probabilidade de detecção de alvos nos mesmos cenários aqui analisados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, O.A. Sistema de Previsão de Alcance Sonar para um Oceano Heterogêneo e Discreto. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) Tese de Doutorado, Engenharia Oceânica, 2005.
- BOYER, T., S. LEVITUS, H. GARCIA, R. A. LOCARNINI, C. STEPHENS, & J. ANTONOV, 2005. Objective analyses of annual, seasonal and monthly temperature and salinity for the world ocean on a 0.25 degrees grid. *Int. J. Climatology*, 25(7), 931 – 945.
- CALADO, L.; SILVEIRA, I.C.A.; GANGOPADHYAY, A.; CASTRO, B.M. 2008. Feature-Oriented Regional Modeling and Simulations (FORMS) for the Western South Atlantic: Southeastern Brazil Region. *Ocean Modelling*, v.25, pp. 48-64.
- CALADO, L.; SILVEIRA, I.C.A.; GANGOPADHYAY, A.; CASTRO, B.M. 2010. Eddy- induced upwelling off Cape São Tomé (22°S, Brazil). *Continental Shelf Reserch*, 30: 1181-1188.
- FOFONOFF, P; MILLARD, R.C. JR. 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Unesco Tech. Pap. In Mar. Sci.*, n. 44.
- SHCHEPETKIN, A. & MCWILLIAMS, J. 2005. The regional oceanic modeling system (roms): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4), 347-404.
- XAVIER, B.C. Modelos de propagação acústica em águas rasas. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) Dissertação de Mestrado, Engenharia Oceânica, 2005.