

# AMBIENTE MARINHO: VARIAÇÕES DIURNAS DA CAMADA DE MISTURA E SEU PAPEL NA GUERRA ANTISSUBMARINA

Marine environment: diurnal variations of the mixed layer and their role in anti-submarine warfare

Thiago Silva Baron<sup>1</sup> , Marcos Tonelli<sup>2</sup> , Victor Bastos Daher<sup>3</sup> ,  
Raphael de Oliveira Benevides<sup>4</sup> , Fernando Ribeiro<sup>5</sup> 

**Resumo:** Este estudo investigou os modos de variabilidade da espessura da camada de mistura na Região Sudeste brasileira, com ênfase nas variações diurnas e seus impactos na propagação acústica submarina. A análise de mais de 10 mil campos do modelo HYCOM revelou que o primeiro modo do ciclo diurno da *empirical orthogonal function* (EOF) explica cerca de 75% da variância, sendo dominado pela troca de calor na interface oceano-atmosfera. As maiores variações ocorrem ao norte do domínio, especialmente no final do inverno e início da primavera. Com base nos dois perfis selecionados, observou-se que alterações diurnas na camada de mistura modificam os perfis de velocidade do som e a probabilidade de detecção do sonar. Destaca-se a formação de canais sonoros superficiais e a refração descendente dos raios acústicos ao entardecer. Os resultados ressaltam a importância do conhecimento detalhado das propriedades oceânicas para a eficácia de operações navais.

**Palavras-chave:** Camada de mistura. Variação diurna. Guerra antissubmarina.

**Abstract:** This study investigated the modes of variability in the mixed layer thickness in the southeastern Brazilian region, with an emphasis on diurnal variations and their impacts on underwater acoustic propagation. The analysis of over 10 thousand fields from the HYCOM model revealed that the first mode of the diurnal EOF explains about 75% of the variance, being dominated by heat exchange at the ocean-atmosphere interface. The largest variations occur in the northern part of the domain, especially at the end of winter and the beginning of spring. Based on two selected profiles, it was observed that diurnal changes in the mixed layer modify sound speed profiles and the probability of sonar detection. Notably, surface sound channels form and acoustic rays undergo downward refraction in the evening. The results highlight the importance of detailed knowledge of oceanic properties for the effectiveness of naval operations.

**Keywords:** Mixed Layer. Diurnal Variation. Anti-Submarine Warfare.

1. Capitão de Corveta (EN). Mestre em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ajudante da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: thiago.baron@marinha.mil.br

2. Capitão de Corveta (RM3-T). Doutor em Oceanografia Física pela Universidade de São Paulo. Encarregado da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: marcos.tonelli@marinha.mil.br

3. Capitão de Corveta (RM3-EN). Doutor em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ajudante da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: victor.daher@marinha.mil.br

4. Capitão Tenente (EN). Mestre em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ajudante da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: raphael.benevides@marinha.mil.br

5. Primeiro Tenente (T). Mestre em Oceanografia Física pela Universidade Federal de Santa Catarina. Ajudante da Divisão de Oceanografia Física do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: fernando.ribeiro-fr@marinha.mil.br

## 1. INTRODUÇÃO

A acústica submarina tem se consolidado como uma ferramenta extremamente útil em diversas aplicações, que podem ser classificadas civis ou militares de acordo com os objetivos pretendidos. No campo civil, destacam-se a localização de cardumes, a prospecção sísmica, a inspeção de equipamentos, o monitoramento ambiental, os levantamentos batimétricos e a identificação de obstáculos à navegação, como o gelo polar. No âmbito militar, além do apoio à navegação, merecem destaque a comunicação submarina e a detecção, classificação, localização e rastreamento de submarinos, minas e embarcações de superfície (HODGES, 2011; MARAGE; MORI, 2013; NEIGHBORS; BRADLEY, 2017) — informações essenciais para garantir vantagens táticas em operações navais.

Os sistemas *Sound Navigation and Ranging* (SONAR), termo adotado pelos EUA durante a Segunda Guerra Mundial em substituição ao *Anti-Submarine Detection Investigation Committee* (ASDIC), utilizado pelos britânicos na Primeira Guerra Mundial, operam com base na propagação de ondas sonoras na água, sendo o equivalente subaquático do radar (HODGES, 2011; NEIGHBORS; BRADLEY, 2017). O principal fator que afeta essa propagação no mar é a velocidade do som (NEIGHBORS; BRADLEY, 2017), cuja estrutura — que determina os caminhos percorridos pelas ondas sonoras partindo de uma fonte emissora — depende do ambiente oceânico, caracterizado por variações horizontais e verticais de temperatura, salinidade e pressão (KUPERMAN, 2019).

Essas variações nas propriedades físicas criam estruturas como o canal *Sound Fixing and Ranging* (SOFAR), onde a velocidade do som atinge um mínimo local em determinada profundidade, permitindo que ondas acústicas de baixa frequência se propaguem por milhares de quilômetros com mínima atenuação (MEDWIN; CLAY, 1997). Por estar localizado abaixo da termoclina principal, camada de transição que separa a camada superficial do oceano de seu interior mais profundo (TOMCZAK; GODFREY, 2003), o canal SOFAR permanece inalterado pelas condições de superfície, especialmente pelo aquecimento solar e pela mistura turbulenta causada pelo vento (NEIGHBORS; BRADLEY, 2017).

No entanto, abaixo da superfície, em profundidades que podem chegar a centenas de metros, o perfil de velocidade do som é sensível às influências superficiais, apresentando

variações diurnas e sazonais (NEIGHBORS; BRADLEY, 2017). Como exemplo, na camada de mistura — presente no topo da coluna d'água e caracterizada por propriedades físicas quase uniformes (TOMCZAK; GODFREY, 2003) —, os raios acústicos podem ficar aprisionados, formando o chamado duto de superfície (URICK, 1979). Essa feição oceânica, cuja espessura pode variar de dezenas a centenas de metros, sofre variações sazonais e geográficas (TOMCZAK; GODFREY, 2003).

Além disso, a camada imediatamente abaixo da superfície do mar — com poucos metros de profundidade — também está sujeita a variações diurnas, aquecendo-se durante o dia e resfriando-se à noite. Nesse período, o aquecimento solar cria um perfil de velocidade do som com refração descendente, o que compromete o desempenho dos sonares de detecção por eco instalados em navios de superfície. Esse fenômeno, observado desde os primórdios das operações com sonar ativo, é conhecido como *afternoon effect*, por ser mais pronunciado nas últimas horas do dia (NEIGHBORS; BRADLEY, 2017).

O conhecimento do ambiente acústico subaquático pode oferecer vantagens táticas significativas durante operações navais, otimizando o uso dos equipamentos sonar e, em muitos casos, influenciando diretamente a escolha do posicionamento tático das embarcações (NATIONAL DEFENSE RESEARCH COMMITTEE, 1946). Nesse sentido, torna-se essencial o domínio da estrutura tridimensional de temperatura e salinidade, bem como da dinâmica da camada de mistura do oceano superior, uma vez que essas propriedades físicas controlam a propagação das ondas sonoras e, por consequência, condicionam a formação de dutos acústicos e zonas de sombra na coluna d'água.

Neste contexto, o presente trabalho — desenvolvido no escopo do projeto *Sistema Tático de Fatores Ambientais* (STFA), no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) —, busca ampliar o conhecimento sobre a variação diurna da camada de mistura na Região Sudeste brasileira e os seus impactos na propagação acústica.

## 2. OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo investigar os principais modos de variabilidade da espessura da camada de mistura

na Região Sudeste brasileira e suas principais forçantes, com ênfase nas variações diurnas e como estas interferem na propagação acústica.

### 3. METODOLOGIA

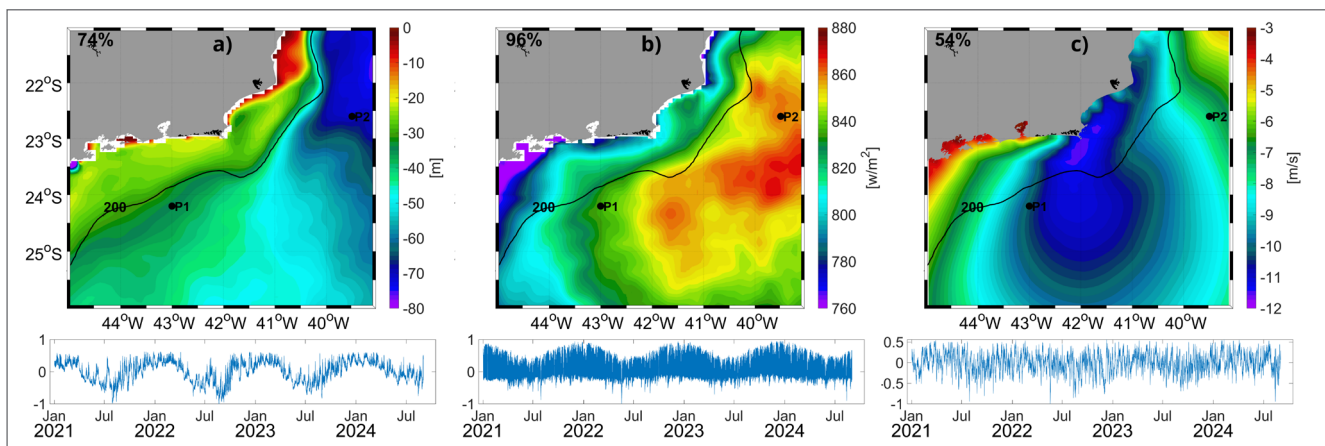
Este trabalho foi realizado com base em aproximadamente três anos e meio (janeiro de 2021 a agosto de 2024) de resultados de simulações numéricas com o modelo *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM) (BLECK, 2002), que integra o sistema operacional de previsão oceânica utilizado pela Marinha dos Estados Unidos (METZGER *et al.*, 2014). A configuração do modelo apresenta discretização zonal de  $1/12^\circ$ , meridional de  $1/24^\circ$  e 41 camadas verticais híbridas (METZGER *et al.*, 2017), o que permite combinar as vantagens de diferentes tipos de coordenadas verticais, otimizando a simulação tanto de feições dinâmicas costeiras quanto da circulação em mar aberto (CHASSIGNET *et al.*, 2003). Os campos de vento utilizados provêm do *Climate Forecast System* (CFSv2) (SAHA *et al.*, 2014), um modelo totalmente acoplado que representa a interação entre a atmosfera, os oceanos, a terra e o gelo marinho, desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

Para a identificação dos principais modos de variabilidade da camada de mistura e de suas principais forçantes

— o vento e o calor total —, foi empregada a análise de funções ortogonais empíricas (*empirical orthogonal function* — EOF), amplamente utilizada nas geociências (HANNACHI, 2004). Essa ferramenta matemática tem como vantagem a capacidade de fornecer uma descrição compacta da variabilidade espacial e temporal de um grande volume de dados (EMERY; THOMSON, 2014). No presente estudo, foram analisados mais de 10 mil campos para cada variável (camada de mistura, vento e calor total), considerando-se que foram utilizados resultados com resolução temporal de 3 horas, com o intuito de capturar a variabilidade diurna na Região Sudeste brasileira.

Cabe destacar que os resultados das EOF e de suas respectivas componentes principais (séries temporais) representam as variações em torno das médias dos dados. Com o intuito de facilitar a visualização desses resultados, foi realizada uma normalização de modo que o produto do valor apresentado na escala de cores pelo valor da componente principal, em determinada data e ponto do domínio, representasse a variação absoluta em torno da média.

Atualmente, alguns Navios da Esquadra Brasileira contam com o Sistema de Previsão do Ambiente Acústico para o Planejamento das Operações Navais (SISPRES), que utiliza a Base de Dados Ambientais Qualificados (BDAQ) para estimar o alcance de sonares. Neste estudo, contudo, com o objetivo de verificar se as variações diurnas da camada de mistura podem influenciar a probabilidade de detecção de um alvo, foram empregados os resultados do modelo HYCOM



**Figura 1.** Primeiro modo (EOF1) do padrão espacial e sua respectiva série temporal da componente principal (PC1) para: a) espessura da camada de mistura; b) calor total; e c) intensidade do vento. A isóbata de 200 m está representada em preto. Dois pontos (P1 e P2) destacados para análises de perfis.

como base para a previsão do alcance sonar pelo SISPRES, uma vez que a BDAQ compreende uma base climatológica e pode conter dados sigilosos.

## 4. RESULTADOS

A Figura 1 apresenta o primeiro modo da análise de EOF aplicada a mais de 10 mil campos de: espessura da camada de mistura (Figura 1a), calor total (Figura 1b) e intensidade do vento (Figura 1c). O padrão espacial da EOF da camada de mistura (Figura 1a) explica 74% da variância total dos dados, com as maiores amplitudes localizadas ao largo da quebra da plataforma e ao norte da região de Cabo Frio ( $\sim 23^\circ\text{S}$ ), podendo atingir um incremento de cerca de 70 m na espessura em relação à média. Ao sul de Cabo Frio, a variação assume um padrão zonal, com as maiores amplitudes na porção leste.

A série temporal (painel inferior da Figura 1a) revela uma clara variação sazonal, com valores negativos no outono e inverno indicando uma camada de mistura mais espessa nesse período. Além disso, observa-se uma componente de alta frequência associada ao ciclo diurno, influenciado pelo balanço térmico na interface oceano-atmosfera.

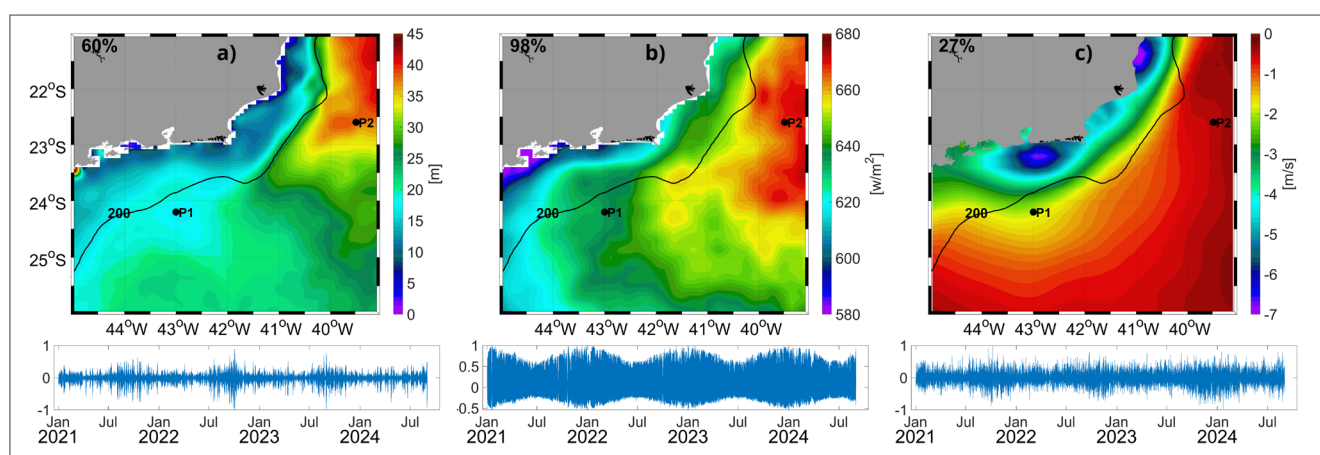
Na Figura 1b, o primeiro modo do calor total explica 96% da variância, com maior variabilidade também concentrada na porção leste da área de estudo. A série temporal exhibe, de modo semelhante à camada de mistura, uma oscilação sazonal

— com amplitudes máximas na primavera e verão — e uma variação diurna atribuída ao ciclo diário do fluxo de calor total na superfície do oceano. O coeficiente de correlação entre as séries temporais do calor total e da espessura da camada de mistura é 0,44, com defasagem de aproximadamente 3 horas, indicando que a resposta da camada de mistura ao aquecimento é retardada.

A correlação entre a série temporal do vento (Figura 1c) e a espessura da camada de mistura tem o coeficiente de apenas 0,29, com a camada de mistura atrasada em 9 horas. No entanto, no segundo modo da EOF (não mostrado neste trabalho), o vento desempenha um papel mais relevante que o do calor, com coeficiente de correlação de 0,41, possivelmente associado à passagem de frentes.

Durante a primavera e o verão, o aumento do fluxo de calor para o oceano intensifica a estratificação da coluna d'água, dificultando a mistura vertical e resultando em camadas de mistura mais rasas. No outono e inverno, por sua vez, o resfriamento da superfície promove instabilidades de fluabilidade, enquanto os ventos, geralmente mais intensos, intensificam a turbulência mecânica, ambos contribuindo para o aprofundamento da camada de mistura (TALLEY, 2011).

Esse mesmo comportamento reproduz-se em escala diurna: sob condições de céu claro e ventos fracos, o ganho de calor durante o dia aumenta a estratificação e restringe a profundidade da mistura, concentrando o aquecimento nos primeiros metros da coluna d'água. À noite, o resfriamento



**Figura 2.** Primeiro modo (EOF1) do padrão espacial e sua respectiva série temporal da componente principal (PC1) para os seguintes campos filtrados: a) espessura da camada de mistura; b) calor total; e c) intensidade do vento. A isóbata de 200 m está representada em preto. Dois pontos (P1 e P2) destacados para análises de perfis.

da superfície induz convecção e mistura turbulentas, rompendo a estratificação e promovendo a renovação vertical da camada de mistura (WIJESEKERA; BOYD, 2001; TALLEY, 2011).

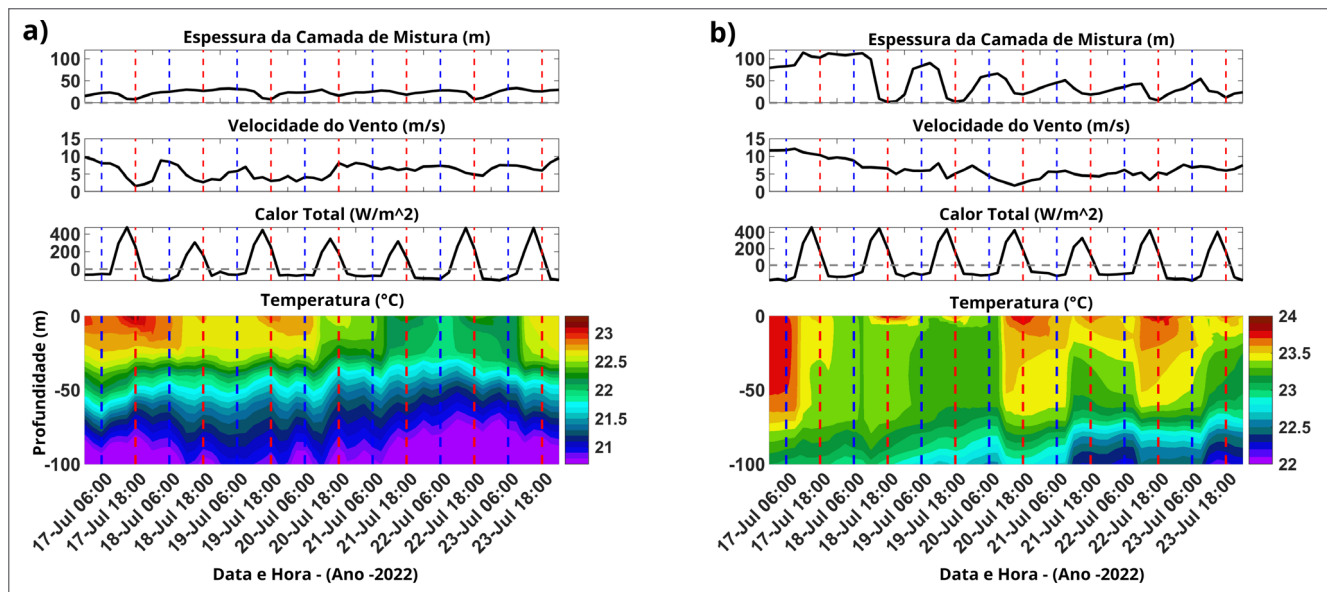
A camada de mistura apresenta variabilidade espacial associada à dinâmica oceânica, influenciada por processos relacionados a frentes, meandros e vórtices. De modo geral, a estrutura da camada superficial varia em uma ampla gama de escalas temporais e espaciais, e tais processos raramente atuam de forma isolada, ou seja, fenômenos em uma escala podem influenciar ou ser modulados por processos de outras escalas (RUDNICK, 2001). Dessa forma, com o objetivo de isolar a variabilidade de alta frequência associada ao ciclo diurno, um filtro passa-alta com frequência de corte de 36 horas foi aplicado sobre os dados e, em seguida, os campos filtrados foram submetidos à mesma análise de EOF realizada anteriormente.

A Figura 2 apresenta os padrões espaciais e temporais do primeiro modo dos campos filtrados de espessura da camada de mistura, calor total e intensidade do vento. Para a camada de mistura, o primeiro modo, associado ao ciclo diurno, responde por 60% da variância dos dados e exibe um padrão espacial semelhante ao da EOF dos campos não filtrados, porém

com amplitudes máximas reduzidas (Figura 2a). No domínio temporal, observa-se que as maiores variações ocorrem no final do inverno e início da primavera, período no qual ainda não foi desenvolvida a termoclina sazonal, marcada pela inibição da mistura vertical profunda (TOMCZAK; GODFREY, 2003) e, portanto, pela redução das amplitudes das variações diurnas.

O coeficiente de correlação entre a série temporal da espessura da camada de mistura (Figura 2a) com a do calor total (Figura 2b) é de -0,78, com a camada de mistura atrasada em 3 horas. Em relação ao vento, a correlação é de 0,48, com o vento atrasado em 3 horas em relação à camada de mistura. Cabe destacar que, conforme o padrão espacial do vento (Figura 2c), as amplitudes de variação são muito baixas ao largo da quebra da plataforma, enquanto valores mais elevados ocorrem próximos à costa, possivelmente em decorrência da atuação de brisas litorâneas. Esses resultados sugerem que, na Região Sudeste, o primeiro modo de variação diurna da espessura da camada de mistura (Figura 2a) seja fortemente dominado pela troca de calor entre o oceano e a atmosfera.

Com o objetivo de avaliar o impacto das variações diurnas observadas sobre a propagação acústica na região de estudo,

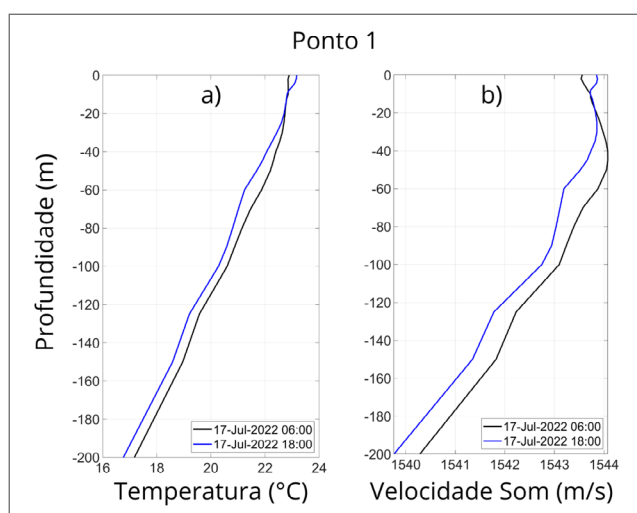


**Figura 3.** a) Hovmöller da temperatura nos primeiros 100 m da coluna d'água para o ponto P1 (indicado nas Figuras 1 e 2) no período de 17 a 23 de julho de 2022 (painel inferior). As linhas tracejadas destacam os horários de 6 h (azul) e 18 h (vermelha). São mostradas as variações da espessura da camada de mistura, intensidade da velocidade do vento e calor total. b) idem a) para o ponto 2 (indicado nas Figuras 1 e 2).

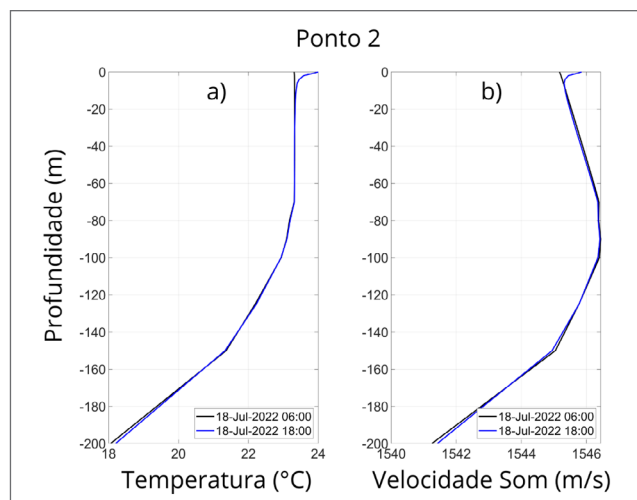
foram selecionados dois pontos para a análise de perfis: um ao sul e outro ao norte da região de estudo, denominados, respectivamente, P1 e P2 (indicados nas Figuras 1 e 2). A Figura 3 apresenta os diagramas de Hovmöller da temperatura nos primeiros 100 m da coluna d'água, referentes ao período de 17 a 23 de julho de 2022, junto com a variação da espessura da camada de mistura, da intensidade da velocidade do vento e do calor total. Observa-se a ocorrência de variações diurnas da camada de mistura com amplitudes menores em P1 (Figura 3a) e mais acentuadas em P2

(Figura 3.b), onde as oscilações podem atingir aproximadamente 100 m. Nesse intervalo, foram registrados ventos de até 10 m/s, sem indícios de quebra da estratificação diurna. Nota-se que o pico de aquecimento das camadas superficiais ocorre por volta das 18 h (destacado pelas linhas tracejadas vermelhas), com atraso de ~3 h em relação ao máximo de calor incidente.

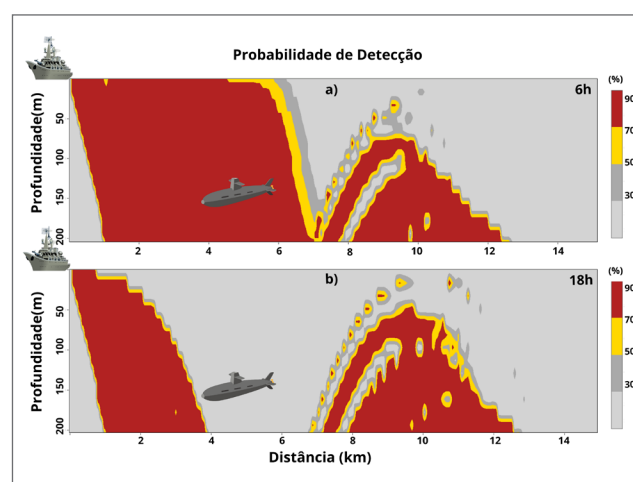
Os perfis de temperatura e salinidade (T e S) nos pontos P1 e P2, nos dias 17 e 18 de julho de 2022, respectivamente, foram utilizados no sistema SISPRES para a estimativa do



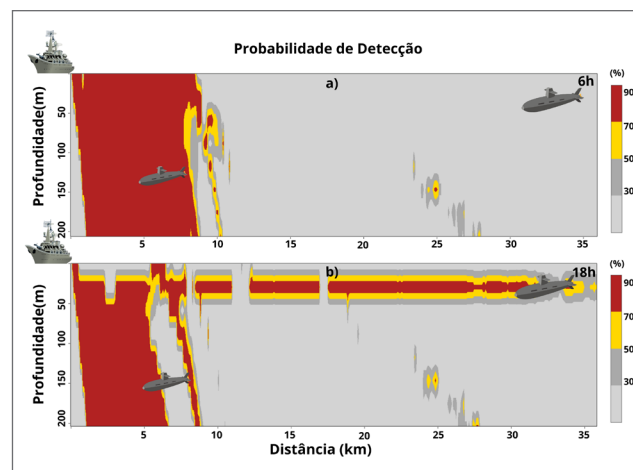
**Figura 4.** Perfis de (a) Temperatura e (b) Velocidade do Som para às 6 h (linha preta) e 18 h (linha azul) para o ponto P1 (indicado nas Figuras 1 e 2).



**Figura 5.** Perfis de (a) Temperatura e (b) Velocidade do Som para as 6 h (linha preta) e 18 h (linha azul) para o ponto P2 (indicado nas Figuras 1 e 2).



**Figura 6.** Probabilidade de detecção referente aos perfis de velocidade e temperatura do ponto P1 (Figura 4) às (a) 6 h e às (b) 18 h, em função da profundidade e da distância.

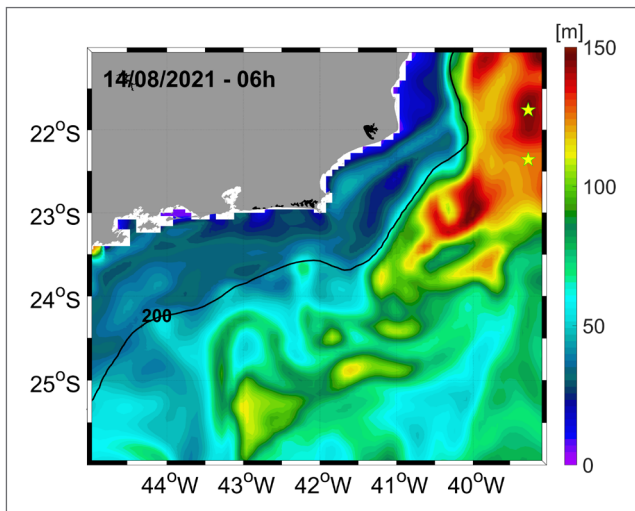


**Figura 7.** Probabilidade de detecção referente aos perfis de velocidade e temperatura do ponto P2 (Figura 5) (a) às 6 h e (b) às 18 h, em função da profundidade e da distância.

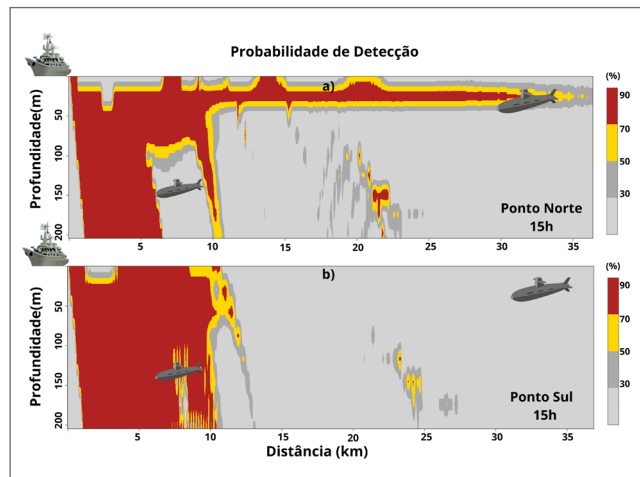
alcance sonar. No ponto P1, às 6 h, observa-se uma camada homogênea até os 10 m de profundidade, para além da qual a temperatura decai quase linearmente até aproximadamente 200 m (Figura 4, linha preta). No mesmo horário, em P2, a camada homogênea estende-se até cerca de 70 m, e depois desse ponto a temperatura diminui até os 200 m, descrevendo um perfil parabólico (Figura 5, linha preta). Às 18h, P1 apresenta aquecimento nos primeiros 10 metros da coluna d'água (com aumento de 0,28°C na superfície), resultando em um perfil de temperatura que decresce linearmente da superfície até os 200 m. Isso mostra que o aquecimento diurno erodiu a camada homogênea presente anteriormente (Figura 4, linha

azul). Em P2, também se observa aumento de temperatura nos primeiros 10 m (0,69°C na superfície), mas o aquecimento restringe-se à camada superficial; abaixo de 10 m, o perfil permanece praticamente inalterado, com uma camada quase homogênea entre 10 e 70 m, seguida por decaimento parabólico (Figura 5, linha azul).

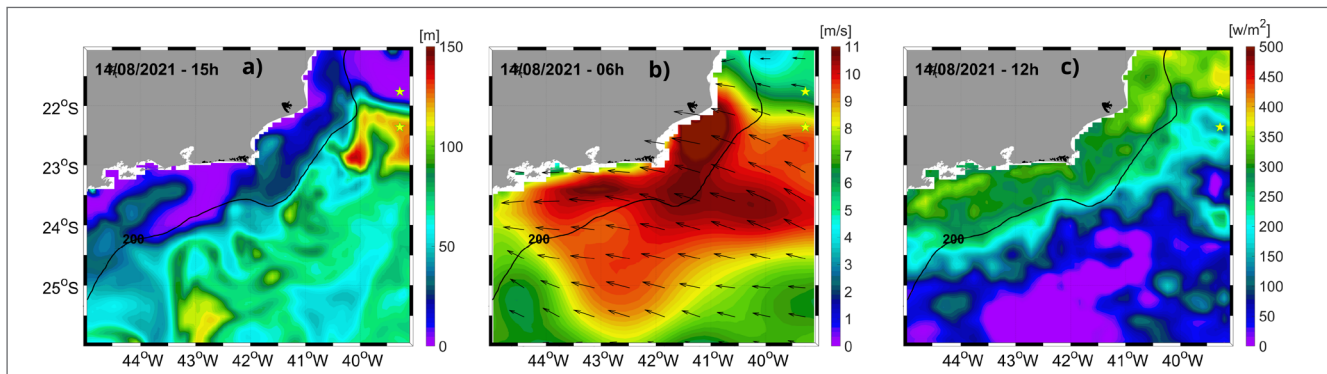
Tais alterações nos perfis térmicos afetam diretamente os perfis de velocidade do som (Figuras 4b e 5b), modificando a propagação dos raios acústicos. O principal efeito do aquecimento diurno na zona de sonificação (região onde a energia sonora se propaga) é a refração descendente dos raios sonoros imediatamente à frente do sonar,



**Figura 8.** Instantâneo da espessura da camada de mistura às 6 h do dia 14 de agosto de 2021. Duas estrelas destacam um ponto ao norte e outro ao sul de uma região com intenso gradiente lateral.



**Figura 10.** Probabilidade de detecção referente aos perfis de velocidade e temperatura dos pontos destacados nas Figuras 8 e 9 em função da profundidade e da distância, (a) ponto norte e (b) ponto sul, ambos para as 15 h.



**Figura 9.** Instantâneo da espessura da camada de mistura (a) às 15 h, instantâneo da intensidade do vento (b) às 6 h e instantâneo do calor total (c) às 12 h para o dia 14 de agosto de 2021. Duas estrelas destacam um ponto ao norte e outro ao sul de uma região com intenso gradiente lateral.

reduzindo o alcance horizontal nas profundidades abaixo da camada de mistura. Por outro lado, quando os perfis térmicos apresentam uma camada homogênea suficientemente profunda, i.e., além do alcance do aquecimento diurno, os raios sonoros inicialmente se refratam para baixo, mas dentro dessa camada homogênea são gradualmente refratados para cima. Antes de alcançarem a superfície, ao encontrarem a camada superficial aquecida, voltam a ser refratados para baixo. Esse comportamento gera uma zona de sonificação na camada superior do oceano, com alcance horizontal de duas a três vezes maior que aquele observado nas regiões mais profundas.

Esse canal sonoro superficial, gerado pelo aquecimento diurno, provoca alterações no alcance dos sonares e, portanto, na probabilidade de detecção de alvos em função da profundidade e da distância horizontal. As Figuras 6 e 7 ilustram essas modificações nos pontos P1 e P2, às 6 h (Figuras 6a e 7a) e 18 h (Figuras 6b e 7b).

Cabe destacar que regiões que apresentam elevados gradientes laterais da camada de mistura possuem alterações relevantes na probabilidade de detecção como as observadas acima. A Figura 8 mostra um instantâneo da espessura da camada de mistura para o dia 14 de agosto de 2021 às 6 h. As duas estrelas amarelas indicam pontos com espessuras da camada de mistura superiores a 100 m. Às 15 h, observa-se um forte gradiente entre os dois pontos destacados (Figura 9.a): ao norte apresentando espessura da ordem de 10 m, enquanto ao sul a espessura é superior a 100 m. Essa diferença, influenciada pelas condições de vento (Figura 9.b) e calor (Figura 9.c), onde foram considerados os atrasos observados neste estudo, resulta em alterações na probabilidade de detecção sonar (Figura 10).

## 5. CONCLUSÃO

Após a análise de mais de 10 mil campos da espessura da camada de mistura, oriundos de simulações com o modelo HYCOM — utilizado no sistema previsor da Marinha Americana —, identificou-se um padrão espacial e temporal que responde por cerca de 75% da variância associada ao ciclo diurno da camada de mistura. Verificou-se que esse padrão é dominado pela troca de calor, e que as maiores amplitudes de variação ocorrem mais ao norte do domínio, em períodos

que coincidem com o final do inverno e o início da primavera, possivelmente associados à ausência de desenvolvimento da termoclina sazonal.

Considerando-se os resultados da EOF, foram selecionados dois perfis de temperatura e salinidade: um ponto mais ao sul (P1), onde as amplitudes das variações diurnas da camada de mistura tendem a ser menores; e outro mais ao norte (P2), que exibe maiores amplitudes. Para verificar como essas alterações diurnas afetam a probabilidade de detecção do sonar nos pontos selecionados, foi utilizado o SISPRESS.

Em ambos os casos, observou-se uma alteração na probabilidade de detecção em função da profundidade e da distância. Os perfis das 18 h exibiram refração descendente dos raios sonoros imediatamente à frente do sonar, reduzindo o alcance horizontal nas profundidades abaixo da camada de mistura, quando comparados aos perfis das 6 h. No perfil mais ao norte (P2), que apresentou uma camada homogênea mais profunda, além da refração observada às 18 h, verificou-se a formação de um canal sonoro nos primeiros 50 m da coluna d'água.

Cabe ainda destacar a importância do conhecimento dos gradientes horizontais das propriedades físicas do oceano. Neste estudo, observou-se que, em pontos relativamente próximos, cerca de 25 milhas, ou aproximadamente uma hora de navegação, um navio pode experimentar uma diferença relevante na probabilidade de detecção do sonar.

Dessa forma, o conhecimento da distribuição espacial das propriedades físicas do oceano permite identificar a existência de canais sonoros de superfície e/ou os efeitos deletérios na propagação do som em maiores profundidades, o que pode constituir uma vantagem tática importante durante operações navais. A capacidade de antecipar regiões de maior ou menor alcance sonar pode ser decisiva para o sucesso de missões de detecção, evasão ou engajamento no ambiente submarino. Nesse contexto, o projeto *Sistema Tático de Fatores Ambientais* (STFA), desenvolvido no IEAPM, além de fornecer climatologias, estuda como os principais fenômenos meteoceanográficos, em diferentes escalas espaciais e temporais, podem afetar a estrutura termohalina do oceano e, conseqüentemente, impactar a propagação acústica. Este estudo procurou focar a Região Sudeste brasileira e as variações intradiárias; nas investigações seguintes, serão ampliados o domínio e a escala temporal (com foco em estruturas sinóticas e, possivelmente, nos efeitos combinados das escalas sinótica e intradiária).

## REFERÊNCIAS

- BLECK, R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, v. 4, n. 1, p. 55-88, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(01)00012-9)
- CHASSIGNET, E. P.; SMITH, L. T.; HALLIWELL, G. R.; BLECK, R. North Atlantic simulations with the Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): Impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and thermobaricity. *Journal of Physical Oceanography*, v. 33, n. 12, p. 2504-2526, 2003. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033%3C2504:NASWTH%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033%3C2504:NASWTH%3E2.0.CO;2)
- EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. *Data analysis methods in physical oceanography*. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- HANNACHI, A. *A primer for EOF analysis of climate data*. Reading: Department of Meteorology, University of Reading, 2004.
- HODGES, R. P. *Underwater acoustics: Analysis, design and performance of sonar*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- KUPERMAN, W. A. Acoustics, deep ocean. In: *ENCYCLOPEDIA OF OCEAN SCIENCES*. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2019.
- MARAGE, J. -P.; MORI, Y. *Sonar and underwater acoustics*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- MEDWIN, H.; CLAY, C. S. *Fundamentals of acoustical oceanography*. San Diego: Academic Press, 1997.
- METZGER, E. J.; HELBER, R. W.; HOGAN, P. J.; POSEY, P. G.; THOPPIL, P. G.; TOWNSEND, T. L.; WALLCRAFT, A. J.; SMEDSTAD, O. M.; FRANKLIN, D. S.; ZAMUDO-LOPEZ, L.; PHELPS, M. W. *Global ocean forecast system 3.1 validation test*. Naval Research Laboratory, 2017.
- METZGER, E. J.; SMEDSTAD, O. M.; THOPPIL, P. G.; HURLBURT, H. E.; CUMMINGS, J. A.; WALLCRAFT, A. J.; ZAMUDIO, L.; FRANKLIN, D. S.; POSEY, P. G.; PHELPS, M. W.; HOGAN, P. J.; BUB, F. L.; DEHAAN, C. J. US Navy operational global ocean and Arctic ice prediction systems. *Oceanography*, v. 27, n. 3, p. 32-43, 2014. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.66>
- NATIONAL DEFENSE RESEARCH COMMITTEE (U.S.). *The application of oceanography to subsurface warfare*. Div. 6 Summary Tech. Report. United States: National Defense Research Committee, 1946. v. 6.
- NEIGHBORS, T.; BRADLEY, D. (org.). *Applied underwater acoustics*: Leif Bjørnø. Oxford: Elsevier, 2017.
- RUDNICK, D. L. Upper ocean time and space variability. In: *ENCYCLOPEDIA OF OCEAN SCIENCES*. San Diego: Academic Press, 2001. v. 6, p. 3114-3120.
- SAHA, S.; MOORTHY, S.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; BEHRINGER, D.; HOU, Y.-T.; CHUANG, H.-Y.; IREDELL, M.; EK, M.; MENG, J.; YANG, R.; PEÑA MENDEZ, M.; VAN DEN DOOL, H.; ZHANG, Q.; WANG, W.; CHEN, M.; BECKER, E. The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, v. 27, n. 6, p. 2185-2208, 2014. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- TALLEY, L. D. *Descriptive physical oceanography: an introduction*. London: Academic Press, 2011.
- TOMCZAK, M.; GODFREY, J. S. *Regional oceanography: an introduction*. Delhi: Daya Books, 2003.
- URICK, R. J. *Sound propagation in the sea*. Washington, D.C.: Department of Defense, Office of the Secretary of Defense, Defense Advanced Research Projects Agency, 1979.
- WIJESEKERA, H.; BOYD, T. J. Upper ocean heat and freshwater budgets. In: *ENCYCLOPEDIA OF OCEAN SCIENCES*. San Diego: Academic Press, 2001. v. 6, p. 3079-3083.