

## A INFLUÊNCIA DA FRENTE TÉRMICA DA RESSURGÊNCIA COSTEIRA DE CABO FRIO NA PERDA DO SINAL ACÚSTICO: UM ESTUDO NUMÉRICO

Codato, G.A.S.

Marinha do Brasil - Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM  
Rua Kioto, 253 - Praia dos Anjos, Arraial do Cabo – RJ, CEP 28930-000  
gabrielcodato@gmail.com

Watanabe, W.B.

Marinha do Brasil - Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM  
Rua Kioto, 253 - Praia dos Anjos, Arraial do Cabo – RJ, CEP 28930-000  
wandrey@ieapm.mar.mil.br

Calado, L.

Marinha do Brasil - Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – IEAPM  
Rua Kioto, 253 - Praia dos Anjos, Arraial do Cabo – RJ, CEP 28930-000  
lcalado@ieapm.mar.mil.br

Martins, N.

Universidade do Algarve – UAlg  
Campus de Gambelas, Faro – Portugal, 8005-139  
nemartins@gmail.com

Ramos, A.E.A.

Universidade Federal do Rio Grande - FURG  
Avenida Itália, km 8, Rio Grande – RS, CEP: 96200-190  
aearamos05@gmail.com

**Resumo:** *Este trabalho avaliou a perda do sinal acústico na presença do gradiente térmico formado pela ressurgência costeira de Cabo Frio – RJ. Para tanto, utilizou-se de um modelo numérico hidrodinâmico para construir a estrutura termohalina da ressurgência. Essa estrutura foi implementada como parâmetro de entrada em um modelo acústico e utilizada como base de propagação do som. Após este procedimento, foram simulados sinais acústicos em dois cenários distintos, um deles representando uma situação de ressurgência intensa, e outro na qual a ascensão da água de fundo não ocorria. A comparação entre esses dois cenários 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. Neste sentido, especula-se que o gradiente térmico promovido pela ressurgência costeira possa prejudicar a detecção de alvos submarinos.*

**Palavras-chave:** *Acústica submarina; ressurgência costeira; modelagem numérica hidrodinâmica; perdas na propagação.*

***Abstract:** This work has evaluated the acoustic signal transmission loss in presence of the thermic gradient produced by the coastal upwelling of Cabo Frio – RJ. A hydrodynamic numerical model was used to built the thermohaline structure of the upwelling. This structure served as an input to an acoustic model and used like a base to the sound propagation. After this procedure, the acoustic signals were simulated in two different scenarios, one with the occurrence of a strong upwelling, and another with no upwelling. The result has shown that the upwelling plume acts as a barrier to the sound propagation. In the absence of upwelling, the acoustic signal could reach greater distances. Then, it's possible that the coastal upwelling can prevent the detection of submarine targets.*

***Keywords:** Ocean acoustics; coastal upwelling; numerical hydrodynamic numerical modeling; transmission loss.*

## **1. Introdução**

### **1.1) Acústica submarina**

A acústica submarina vem sendo utilizada em diversas atividades, tanto militares quanto civis, que visam à exploração dos oceanos. Os principais campos de aplicação estão relacionados à detecção e localização de alvos submarinos, à prospecção de recursos naturais marinhos, aos levantamentos batimétricos, à pesca e à navegação (XAVIER, 2005).

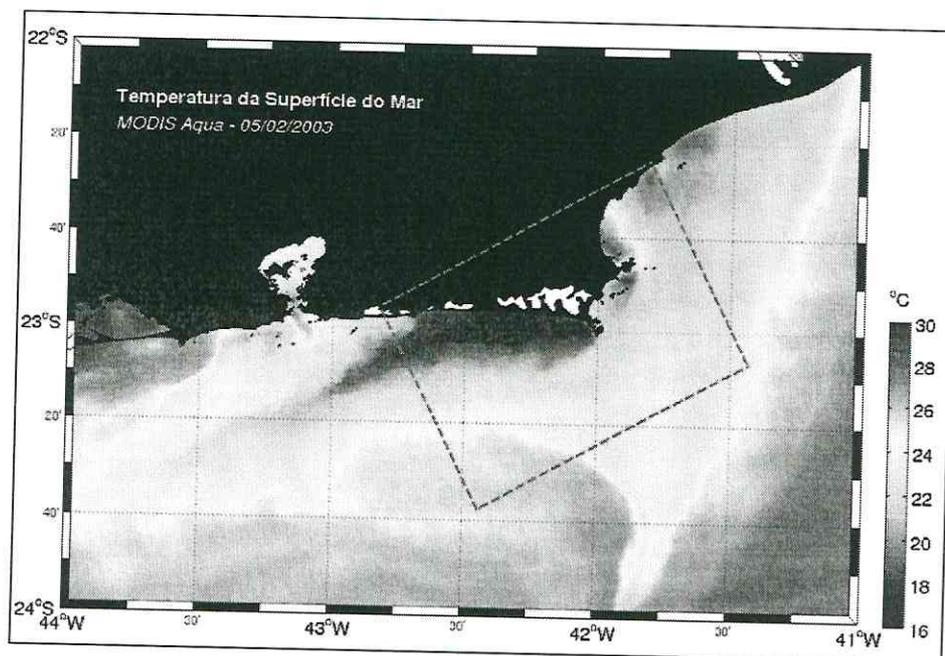
A utilização dos equipamentos sonares em operações navais militares passou a ter maior importância durante a Segunda Guerra Mundial, onde as técnicas acústicas de detecção de alvos permitiam a localização de submarinos, principal arma de ataque aos navios. Desde então, o uso do sonar ativo e passivo tornou-se um instrumento fundamental na manutenção 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.

A propagação dos sinais acústicos na água do mar depende essencialmente da estrutura termohalina e sua referente estratificação, sendo esta regida pelos padrões de densidade. Neste contexto, as condições de temperatura e salinidade alteram a propagação e o alcance dos equipamentos sonares. Todavia, a temperatura é o parâmetro mais importante, influenciando diretamente na velocidade de propagação do som. De fato, a variabilidade termohalina provoca efeitos no campo acústico submarino, causando incertezas no seu prognóstico. Dessa forma, a previsão e o monitoramento sinótico dos processos oceanográficos são fundamentais para subsidiar uma previsão acústica acurada.

A modelagem numérica hidrodinâmica é uma das ferramentas que traduz de forma espaço-temporal toda a estrutura tridimensional termohalina e dinâmica do movimento do oceano, propiciando a investigação de fenômenos físicos que interagem com o ambiente acústico. O presente estudo foi baseado nessa abordagem, onde um modelo numérico da ressurgência costeira de Cabo Frio foi utilizado como parâmetro de entrada para um modelo de propagação do som.

## 1.2) A ressurgência costeira de Cabo Frio

A região oceânica ao largo de Cabo Frio apresenta características oceanográficas e hidrodinâmicas peculiares (CALADO et al., 2008). Dentre os fenômenos que tornam esta região um domínio complexo, destaca-se a ocorrência de processos de ressurgência (CARRIERE et al., 2010). A ressurgência costeira em Cabo Frio é resultado de uma combinação entre a própria configuração da costa e a persistência de ventos de quadrante nordeste – que ao fluir por vários dias consecutivos na mesma direção, acarreta no afastamento das águas 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 (RODRIGUES E LORENZZETTI, 2001).



**Figura 1 – Imagem de temperatura da superfície do mar (TSM) evidenciando o fenômeno da ressurgência costeira em Cabo Frio (Fonte: Cortesia de Ricardo Domingues – IEAPM)**

O gradiente térmico formado entre a pluma de ressurgência e as águas mais quentes da CB tem a capacidade de modificar a velocidade de propagação do som e o alcance das transmissões acústicas. O objetivo central deste estudo foi simular um ambiente termohalino realístico, de forma a avaliar o desempenho de sinais acústicos ao longo da frente térmica da ressurgência, buscando compreender a sua relação com as perdas na propagação acústica.

## 2. Metodologia

O embasamento metodológico deste trabalho foi fundamentado em técnicas de modelagem hidrodinâmica e acústica, de forma a estabelecer uma compreensão sinótica da propagação de sinais sonoros ao longo do gradiente térmico provocado pela ressurgência de Cabo Frio. Para tanto, foi necessário a utilização de um modelo numérico hidrodinâmico para a construção da estrutura termohalina, a qual foi implementada como parâmetro de entrada em um modelo de propagação acústica, que efetivamente simulou a transmissão dos sinais sonoros.

### 2.1) 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 22S – 24S de latitude e 44W – 41W de longitude – Figura 2 (a). Neste experimento, a única forçante utilizada foi a tensão de cisalhamento do vento, extraída do modelo global NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), 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. A grade possui limites 22,86S-23,1S de latitude e 42,19W-42,89W 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 2 (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).

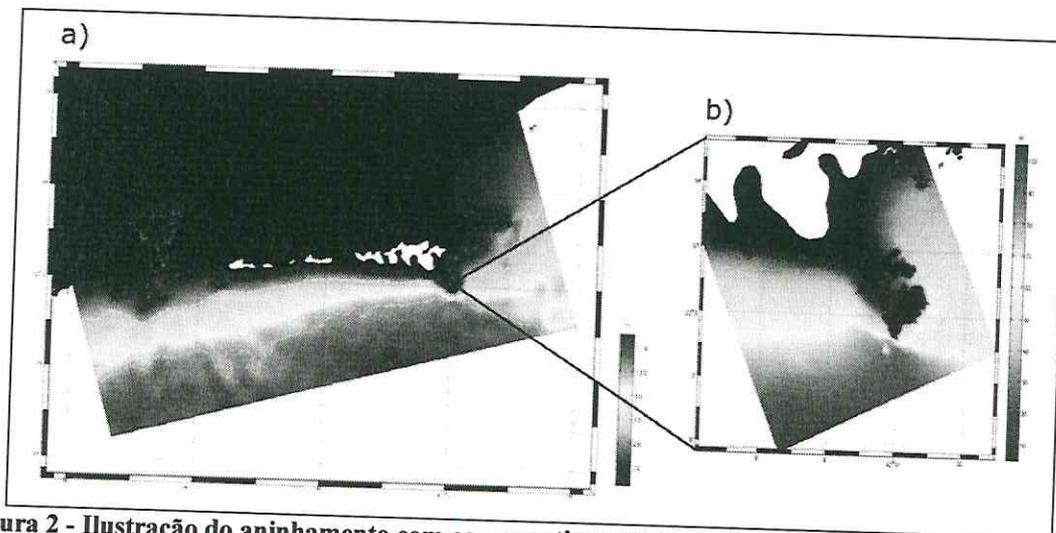


Figura 2 - Ilustração do aninhamento com as respectivas grades batimétricas, onde (a) representa a grade de menor resolução, e (b) a grade de maior resolução espacial na região de Cabo Frio.

Dos resultados do modelo numérico, foram selecionados dois cenários distintos, sendo um deles representativo da ressurgência costeira – Figura 3 (a), e outro de uma situação onde a ressurgência não ocorria – Figura 3 (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.

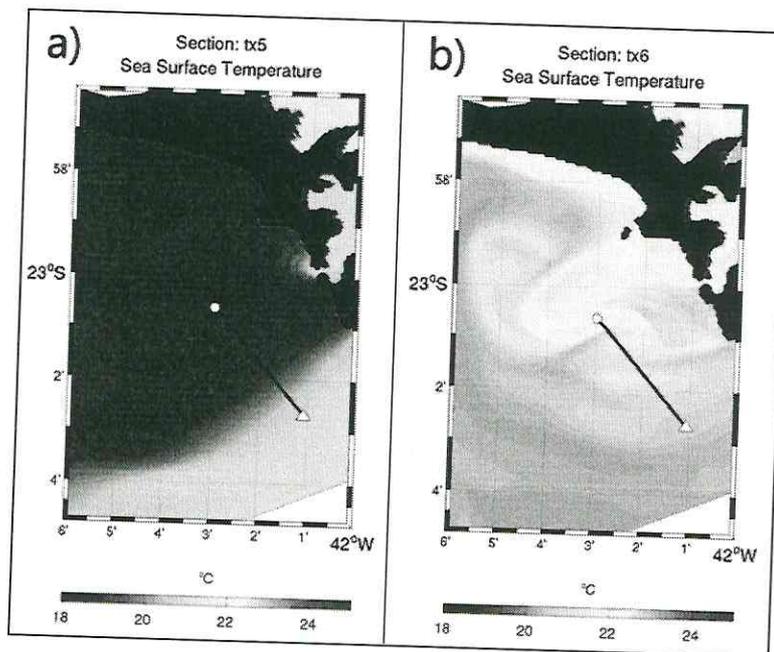


Figura 3 - (a) Seção de temperatura da superfície do mar representativa de um cenário (a) com ressurgência e um (b) sem ressurgência. Os transectos representam as seções termohalinas utilizadas como entrada do modelo acústico, onde o triângulo é a posição da fonte sonora, e o círculo o receptor.

## 2.2) Modelo de propagação acústica

A propagação dos sinais acústicos foi realizada através do modelo acústico *BELLHOP* (PORTER & BUCKER, 1987), um eficiente programa de traçamento de feixes, desenvolvido em linguagem Fortran como parte do *software Acoustic Toolbox*. Este modelo foi projetado para executar o traçamento bidimensional de raios acústicos em um determinado campo de velocidade do som.

Nesta simulação, a propagação dos feixes foi realizada a partir de 10 m de profundidade, em ângulos de  $-45^\circ$  a  $45^\circ$ , com frequência de 1500 Hz. O receptor foi posicionado a uma distância de 5 km da fonte sonora. A condição de contorno superficial considerada foi o vácuo, enquanto a de fundo foi a condição de semi-fundo infinito. Os parâmetros de fundo utilizados foram densidade do sedimento de  $2023 \text{ kg/m}^3$  (BUCKINGHAM, 2004), velocidade compressional do som no sedimento de 1750 m/s e atenuação do fundo de  $0,107 \text{ dB/m/kHz}$  (SCHOCK, 2004). A análise da distorção dos sinais acústicos foi feita a partir do cálculo do parâmetro de Perdas na Propagação,

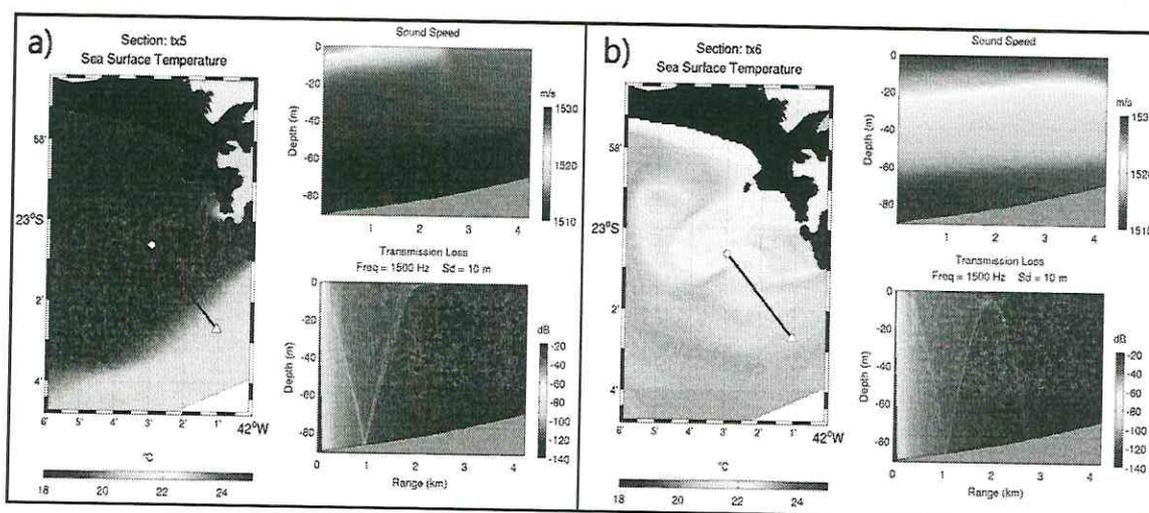
conhecido por *Transmission Loss* (TL).

### 3. 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 4 (a), 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. Ainda nesta figura (b), 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 4).



**Figura 4 – Mapa de TSM, seção vertical de velocidade do som e seção vertical de perdas na propagação para o cenário com ressurgência (a) e para o cenário sem ressurgência (b).**

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 cujo nível 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 Intensidade 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:

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

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.

#### 4. 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

- [1] Aguiar, O.A. 2005. Sistema de Previsão de Alcance Sonar para um Oceano Heterogêneo e Discreto. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ, Doutorado, Engenharia Oceânica).
- [2] 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.
- [3] Buckingham, M. J. 2004. Rapid Environmental assessment with ambient noise. Delft, Holanda: Proceedings of the Seventh European Conference on Underwater Acoustics, ECUA.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] Carrière, O.; Hermand, J.P.; Calado, L.; De Paula, A.C.; Silveira, I.C.A. 2010. Range-dependent acoustic tomography by oceanic feature modeling for the monitoring of upwelling (Cabo Frio, Brazil). Institute of Electronics Engineers, Oceanic Engineering Society, IEEE.
- [7] Fofonoff, P; Millard, R.C. JR. 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco Tech. Pap. In Mar. Sci., n. 44.
- [8] Porter, M.B.; Bucker, H.P. 1987. "Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields", J. Acoust. Soc. Am. 82, 1349-1359
- [9] Rodrigues, R.R.; Lorenzetti, J. A. 2001. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the southeast Brazilian coastal upwelling. *Continental Shelf Research*, 21: 371- 394.
- [10] Schock, S. G. 2004. Remote estimates of physical and acoustic sediment properties in the South China Sea using Chirp Sonar data and the Biot Model. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 29, n. 4, p. 1218-1230.
- [11] 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.
- [12] Xavier, B.C. 2005. Modelos de Propagação Acústica em Águas Rasas. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica).