



## USO DO MÉTODO DAS IMAGENS MODIFICADO PARA LOCALIZAÇÃO DA FONTE POR MÉTODOS PASSIVOS EM ÁGUAS ULTRARRASAS USANDO UM ÚNICO HIDROFONE

*Capitão de Corveta Wendel Quintana  
Freitas de Lima<sup>1</sup>; e  
Capitão de Fragata (T) Rogério de Moraes  
Calazan<sup>2</sup>*

### RESUMO

Nesta pesquisa, é relatada uma aplicação que utiliza a transmissão e recepção de sinais de banda larga para estimar a profundidade e distância de uma fonte submarina em um ambiente de águas ultrarrasas. Para tanto, é descrita uma técnica de localização usando apenas um hidrofone, em um ambiente com incertezas sobre os parâmetros do fundo marinho. Os dados experimentais utilizados nesse artigo foram coletados na Enseada dos Anjos, situada em Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro, em 25 de outubro de 2023. O algoritmo de processamento de campo casado é utilizado para encontrar a melhor correspondência entre o sinal recebido e o sinal de réplica gerado utilizando o método das imagens modificado. Os resultados da simulação e da análise dos dados experimentais indicam a possibilidade de localizar fontes de banda larga, em um ambiente de águas ultrarrasas, caracterizado por múltiplos caminhos de reflexão.

<sup>1</sup>Oficial do Corpo da Armada graduado em Engenharia Mecânica (UERJ). Mestrando em Acústica Submarina pelo IEAPM-MB. Email: wendelqlima@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Oficial do Quadro Técnico (RM-1) graduado em Ciência da Computação (Universidade Católica de Petrópolis). Mestrado em Engenharia Eletrônica na área de Sistemas Inteligentes e Automação (UERJ). Doutorado em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações na área de acústica submarina (Universidade do Algarve). Atualmente é pesquisador do Projeto SISPRES no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e professor do Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina. Email: moraes.calazan@marinha.mil.br



**Palavras-chave:** Acústica submarina. Método das imagens. Localização passiva.

## ABSTRACT

In this research, an application is reported that uses the transmission and reception of broadband signals to estimate the depth and distance of an underwater source in an ultra-shallow water environment. To this end, a localization technique using only a hydrophone is described, in an environment with uncertainties about the parameters of the seabed. The experimental data used in this article were collected in Enseada dos Anjos, located in Arraial do Cabo, in the state of Rio de Janeiro on October 25, 2023. The matched field processing algorithm is used to find the best correspondence between the signal received and the replica signal generated using the modified imaging method. The results of the simulation and analysis of experimental data indicate the possibility of locating broadband sources in an ultra-shallow water environment, characterized by multiple reflection paths.

**Keywords:** Underwater acoustics. Image method. Passive location.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos veículos submarinos não tripulados (*Unmanned Underwater Vehicles* - UUVs) tem levantado preocupações sobre a segurança das instalações portuárias, dada sua habilidade para operar em áreas de difícil acesso. Isso aumenta a relevância da detecção de fontes sonoras em contextos costeiros de águas ultrarrasas. O ambiente oceânico raso é extremamente complicado (Kuperman, et. al, 2004) e, de acordo com (JENSEN, et. al, 2011), a presença de múltiplos caminhos de propagação, que é uma característica típica

de guias de onda em águas rasas, é amplificada no guia de ondas. Neste contexto, a complexidade do processamento do sinal é ampliada devido às intensas variações na amplitude e fase do sinal.

O método de processamento de campo casado (*Matched Field Processing* - MFP) é uma abordagem para a localização de fontes em ambientes acústicos que possuem múltiplos caminhos (Worthmann, et. al, 2015). A utilização de técnicas de banda larga tornou-se uma estratégia para ampliar a quantidade de dados e melhorar a estabilidade do processo de estimativa. Uma vez que incertezas sobre o ambiente podem impedir a localização da fonte pelo método MFP (Soares & Jesus, 2003).

No trabalho apresentado por (Aubauer, et. al, 2000) os autores desenvolveram uma técnica de localização de golfinhos em águas rasas usando apenas um hidrofone, baseada nos atrasos dos caminhos direto e com reflexão. Na pesquisa desenvolvida em (Wilmut, et. al, 2007) um modelo de propagação baseado no método de imagens é desenvolvido para calcular campos de réplica para a inversão de dados de campo acústico em um conjunto de hidrofones. Em (LI, X. et. al, 2023) os autores propõem um método baseado na teoria de modos normais que pode estimar o alcance de propagação em ambiente marinho desconhecido com um único hidrofone. A pesquisa realizada por (Liang, N. et. al, 2020) consiste estimativa de alcance da fonte passiva de hidrofone único usando filtro de correspondência de fase.

A ausência de informações prévias sobre o ambiente marinho torna complexo o uso de um único hidrofone para detectar fontes sonoras. Adicionalmente, nos artigos pesquisados na literatura, não foram encontradas pesquisas sobre localização de fontes de banda larga para a profundidade do guia de ondas analisada neste artigo.



## 2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é descrever uma técnica de localização usando apenas um hidrofone em um ambiente marinho de águas ultrarrasas.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, um algoritmo de MFP foi utilizado para a encontrar a melhor correspondência entre o sinal recebido e o sinal de réplica. As réplicas foram geradas utilizando o método das imagens (MI) modificado, que considera as interações com o fundo elástico, utilizando uma batimetria e um perfil de velocidade do som constante.

### 3.1. Base teórica

A equação geral de uma onda sonora para a pressão acústica pode ser escrita no domínio do tempo, baseada nos princípios fundamentais da conservação da massa, a equação de Euler (segunda lei de Newton) e a equação de estado adiabática, da seguinte forma (Jensen, et. al, 2011)

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0,$$

a solução geral dessa equação utilizando coordenadas esféricas é dada por

$$p = \frac{\hat{p}}{r} e^{j(\omega t - kr)},$$

onde  $\hat{p}$  é a amplitude complexa da pressão sonora,  $\omega=2\pi f$  é a frequência angular,  $k=2\pi/\lambda$  é o número de onda,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $r$  é a distância entre a fonte e o receptor.

A resposta em frequência do canal para o sinal da fonte pontual impulsiva é transformada de Fourier da resposta ao impulso do canal (*Channel Impulse Response* –

CIR), e a resposta em frequência do canal é a combinação ponderada dos vários percursos (ABRAHAM, DOUGLAS A, 2019).

$$H(f, z, r) = \sum_{i=1}^N a_i e^{-j2\pi f \tau_i},$$

onde  $\alpha_i=1/r_i$   $a$  é a amplitude do espalhamento esférico e  $\tau_i=r_i/c$  é o atraso do  $i$ -ésimo caminho para a velocidade do som constante,  $C_w = 1500$  m/s.

### 3.2. Método das imagens modificado

O MI combina as soluções do campo de pressão direto entre a fonte e o receptor com o campo produzido pelas fontes de imagem resultantes das reflexões nas fronteiras. No guia de ondas oceânico ideal, as propriedades são independentes do alcance, apresentando uma velocidade constante na coluna d'água e limites perfeitamente refletivos (Jensen, et. al, 2011).

O MI modificado (MI+), implementado neste trabalho, consiste em considerar o coeficiente de reflexão no fundo elástico.

Os caminhos produzidos pelas fontes de imagem são determinados pela seguinte expressão

$$R_{mn} = \sqrt{2^2 r + z_{mn}^2},$$

onde,  $z_{m1} = 2Dm + z_s + z_r$ , e

$$z_{m2} = 2D(m + 1) - z_s + z_r.$$

Dessa forma, a expressão para os campos de réplica de banda larga,

$$P(f, z, r) = \sum_{m=0}^{\infty} (R_s R_f)^m \left[ \frac{e^{jkR_{m1}}}{R_{m1}} + R_s \frac{e^{jkR_{m2}}}{R_{m2}} \right]$$

onde  $R_s=-1$  e o coeficiente de reflexão  $R_f$  para um fundo elástico é (Rodriguez, O., 2021)



$$R_f(\theta) = \frac{C(\theta)\cos\theta - 1}{C(\theta)\cos\theta + 1},$$

$$\text{onde, } C(\theta) = A_1 \left( A_2 \frac{1-A_7}{\sqrt{1-A_6^2}} + A_3 \frac{A_7}{\sqrt{1-\frac{A_5}{2}}} \right)$$

$$A_1 = \rho_2 / \rho_1,$$

$$A_2 = \tilde{c}_{p2} / c_{p1},$$

$$A_3 = \tilde{c}_{s2} / c_{s1},$$

$$A_4 = A_3 \sin\theta,$$

$$A_5 = 2A_4^2,$$

$$A_6 = A_2 \sin\theta, \text{ e}$$

$$A_7 = A_5 (2 - A_5).$$

A onda que reflete em um fundo elástico excita a propagação das ondas longitudinal e transversal.  $A_1$  é a razão das densidades,  $A_2$  é a razão entre a velocidade da onda de compressão no fundo e a velocidade de propagação do som na água, e  $A_3$  é a razão entre a velocidade da onda de cisalhamento e a velocidade de propagação do som na água. A atenuação da onda de compressão e a atenuação da onda de cisalhamento são definidas pelas variáveis  $\alpha_p$  e  $\alpha_s$ , respectivamente (RODRIGUEZ, O., 2021).

$$\tilde{c}_{p2} = c_{p2} (1 - i\tilde{\alpha}_{cp}) / (1 - i\tilde{\alpha}_{cp}^2)$$

$$\tilde{c}_{s2} = c_{s2} (1 - i\tilde{\alpha}_{cs}) / (1 - i\tilde{\alpha}_{cs}^2)$$

$$\tilde{\alpha}_{cp} = \alpha_{cp} / 40\pi \log e$$

$$\tilde{\alpha}_{cs} = \alpha_{cs} / 40\pi \log e$$

### 3.3. Processamento de campo casado

Inicialmente foi calculada a matriz de covariância dos dados:

$$R = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L d \tilde{d}$$

onde  $\tilde{d}$  é o conjugado complexo da observação,  $d$  é a observação e  $L$  representa o número de elementos. O estimador de Bartlett definido como (RODRIGUEZ, O., 2021):

$$B(r, z) = e^{\hat{R}e}$$

onde  $e$  é a previsão modelada com o método das imagens.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia apresentada é demonstrada usando dados experimentais coletados na Enseada dos Anjos, situada em Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro, em 25 de outubro de 2023. Um único hidrofone foi implantado a uma profundidade de aproximadamente 3 m. Neste experimento, um projetor acústico foi instalado a uma distância de aproximadamente 480 m do hidrofone, a uma profundidade de 6 m. A transmissão de uma sequência de sinais lineares modulados em frequência (*Linear Frequency Modulation – LFM*) foi realizada por um projetor acústico, e a recepção, por um hidrofone conforme mostrado na Figura 1. A sensibilidade do hidrofone empregado foi de -153 dB re 1 V /  $\mu$  Pa.

O sinal LFM transmitido pode ser expresso como um sinal cosseno com frequência variando linearmente, onde  $f_o = 5$  kHz é a frequência inicial, que varia em função do tempo. A inclinação (Hz/s) da frequência é a divisão da largura da banda  $B = 5$  kHz pela largura do pulso  $\tau_p = 100$  ms. Foi aplicada a janela Tukey ao sinal e cada transmissão era seguida por um intervalo de 1 s de silêncio. Ao todo, foram realizadas 50 transmissões. Os dados acústicos obtidos pelo hidrofone foram gravados em arquivos de áudio (.WAV), com a frequência de amostragem  $f_s = 50$  kHz.

O uso da correlação cruzada permitiu detectar o sinal nas gravações e separar os intervalos das recepções. Em seguida, para gerar o sinal medido, a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*) foi aplicada nos intervalos selecionados das recepções.

A técnica fundamentada em MFP foi implementada em intervalos ampliados a fim de incorporar incertezas no



ambiente. Além disso, foram conduzidos processamentos com diferentes tipos de fundos, conforme apresentado na Tabela 1. As matrizes de busca para ambos os

ambientes, simulado e experimental, foram determinadas usando distâncias que variavam de 0 a 1000 m e profundidades que variavam de 0 a 10 m.

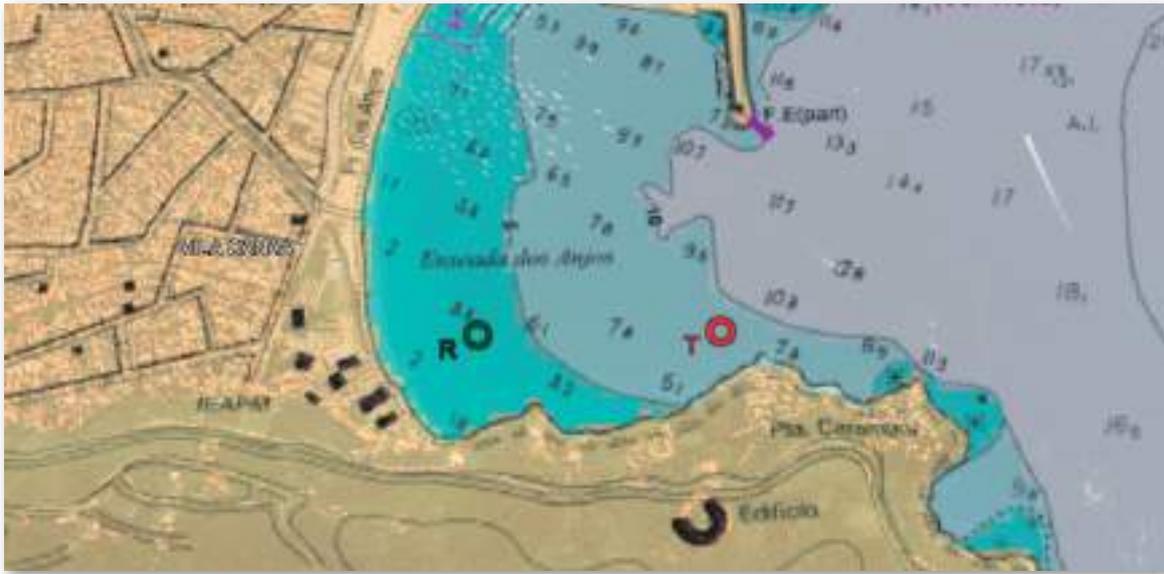


Figura 1 – Localização do projetor acústico, em vermelho, e do receptor, em verde. Fonte: Adaptado de GOOGLE MAPS

Tabela 1. Parâmetros do fundo (Rodriguez, O., 2021)

Tipo	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$c_p(\text{m/s})$	$c_s(\text{m/s})$	$\alpha_p(\text{dB/})$	$\alpha_s(\text{dB}/\lambda)$
Areia Fina	1.900	1.650	200	0,8	2,5
Lama	1.800	1.600	400	0,2	1,8
Gravilha	1.500	1.700	180	0,8	1,5
Areia	2.000	1.800	600	0,1	2,0
Argila Arenosa	1.700	1.820	260	0,4	0,6
Areia Grossa	2.100	1.950	350	0,5	0,9
Calcário	2.700	3.000	1.500	0,1	0,2
Basalto	2.400	5.250	2.500	0,1	0,2



#### 4.1. Resultados simulados

Nessa subseção, são apresentados os resultados decorrentes das variações da geometria, utilizando um ambiente simulado. A Figura 2 ilustra o resultado obtido empregando o MI clássico, sem a consideração

dos coeficientes de reflexão no fundo, enquanto a Figura 3 demonstra o resultado encontrado com o MI+, levando em conta o fundo de areia. A modelagem das réplicas de banda larga do sinal resultou em uma precisão de 100% para a profundidade e a distância.

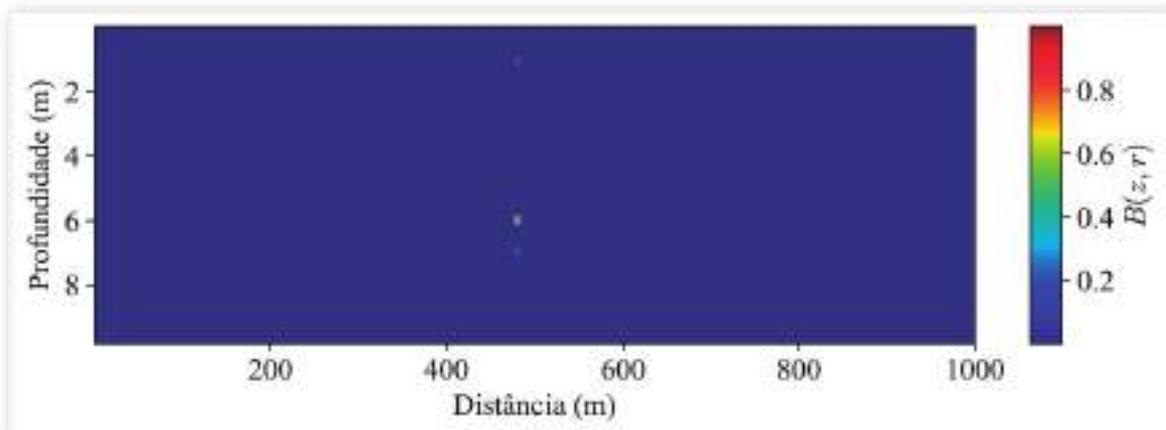


Figura 2 –  $B(z,r)$  do ambiente simulado, calculado com o MI clássico.  $z_0 = z = 6$  m,  $r_0 = r = 480$  m

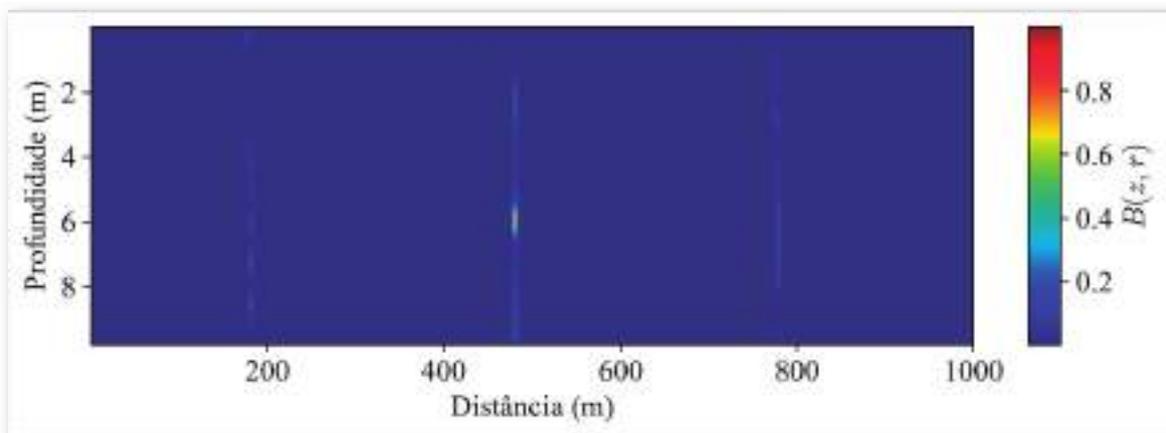


Figura 3 –  $B(z,r)$  do ambiente simulado, calculado com o MI+.  $z_0 = z = 6$  m,  $r_0 = r = 480$  m



## 4.2. Resultados experimentais

Os resultados do processamento dos dados experimentais, provenientes das variações na geometria e no fundo, são apresentados nas figuras seguintes. A Figura 4 é referente ao MI clássico e as Figuras 5 a 12 são referentes ao emprego do MI+, utilizando os parâmetros do fundo apresentados na Tabela 1.

As superfícies de ambiguidade para os fundos testados surgem em distâncias parecidas, entretanto, para alguns fundos, a dispersão é maior.

A Tabela 2 mostra os resultados da localização estimada, em profundidade e distância, de cada processamento, utilizando os valores máximos das matrizes  $B(z,r)$ .

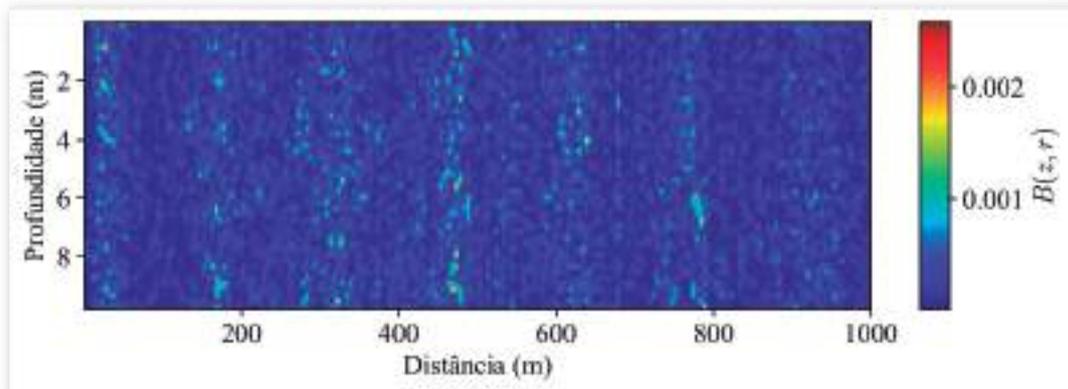


Figura 4 –  $B(z,r)$  empregando o MI clássico. Fonte: Elaboração própria

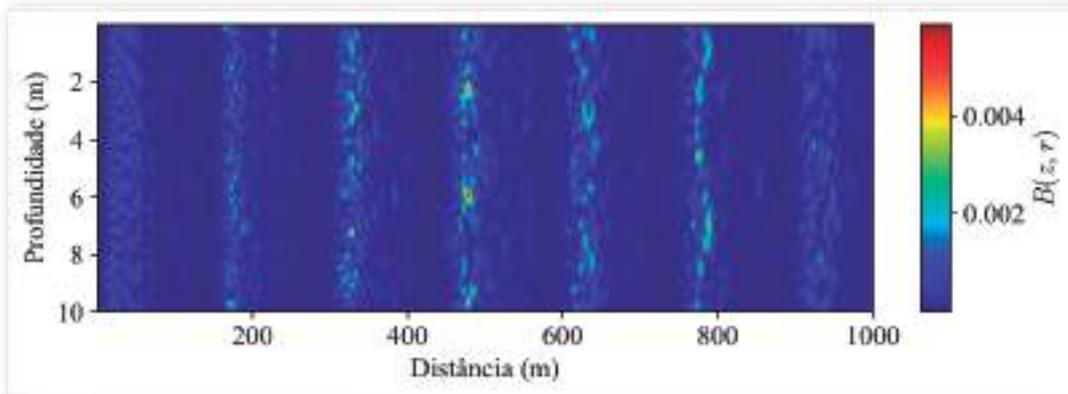


Figura 5 –  $B(z,r)$  para o fundo de areia fina, empregando o MI+. Fonte: Elaboração própria

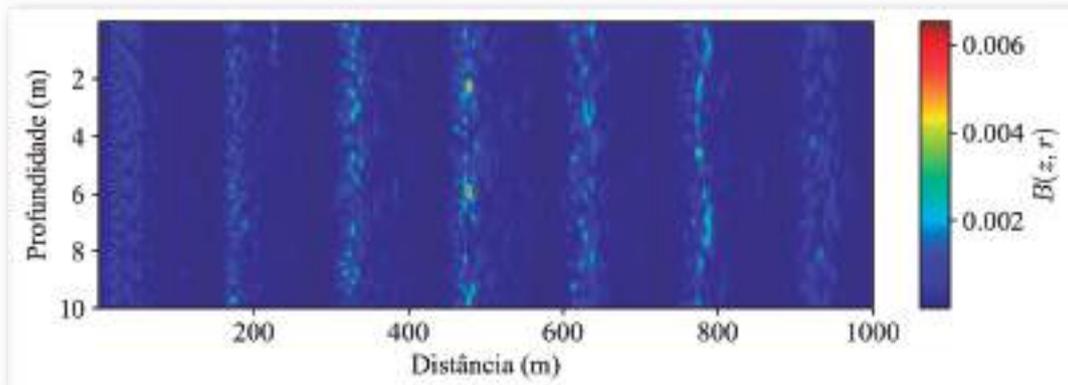


Figura 6 –  $B(z,r)$  para o fundo de lama, empregando o MI+. Fonte: elaboração própria

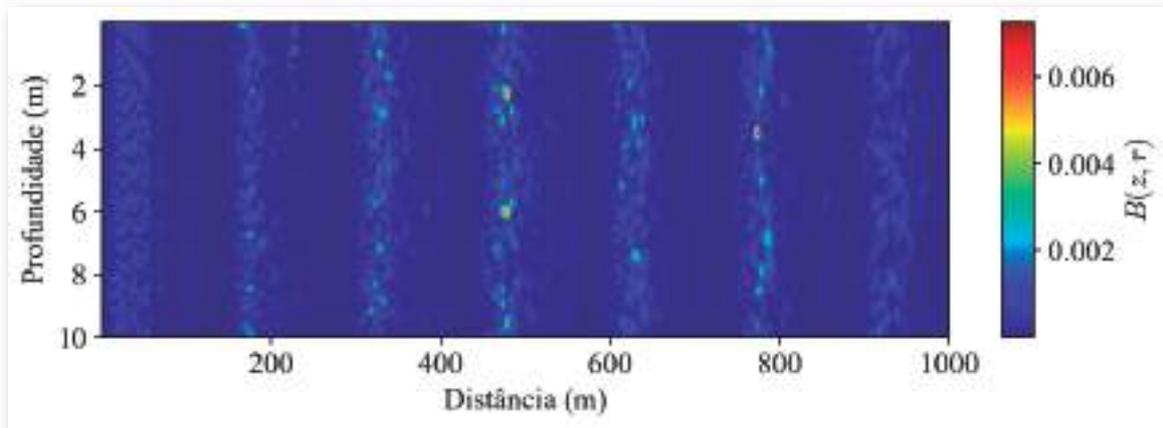


Figura 7 –  $B(z,r)$  para o fundo de gravilha, empregando o MI+. Fonte: elaboração própria

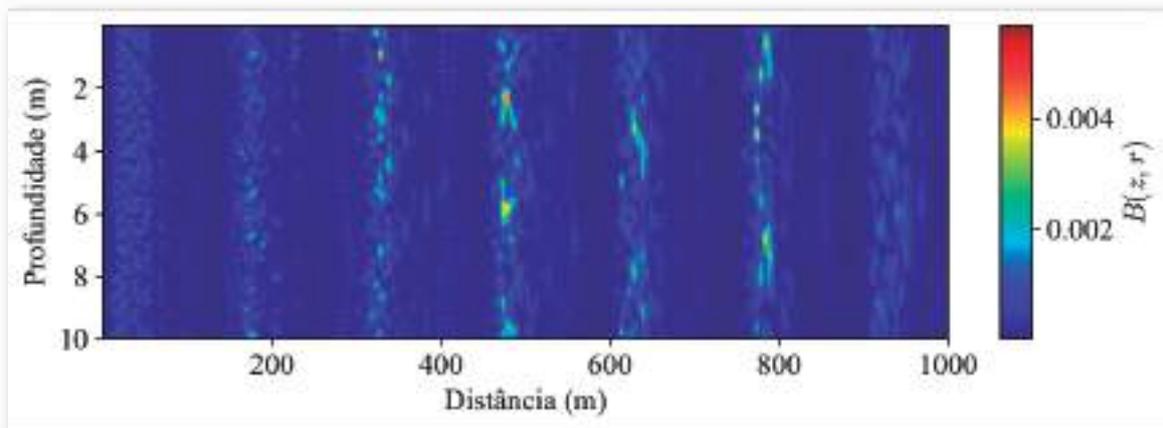


Figura 8 –  $B(z,r)$  para o fundo de areia, empregando o MI+. Fonte: elaboração própria

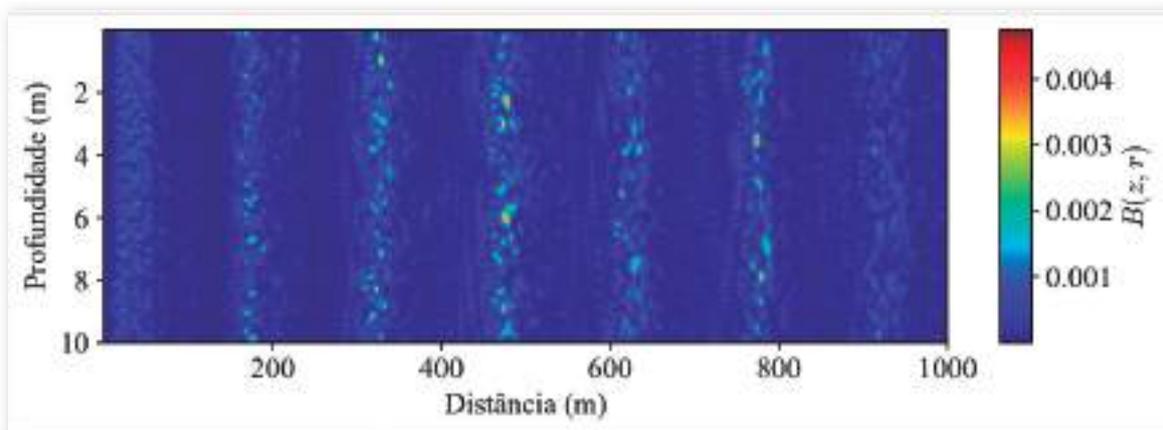


Figura 9 –  $B(z,r)$  para o fundo de argila arenosa, empregando o MI+. Fonte: elaboração própria

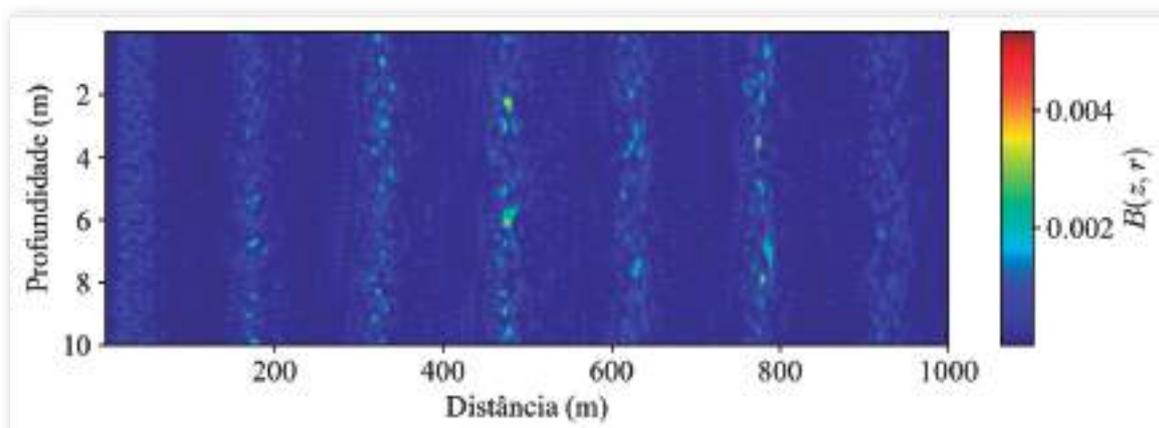


Figura 10 –  $B(z,r)$  para o fundo de areia grossa, empregando o MI+. Fonte: elaboração própria

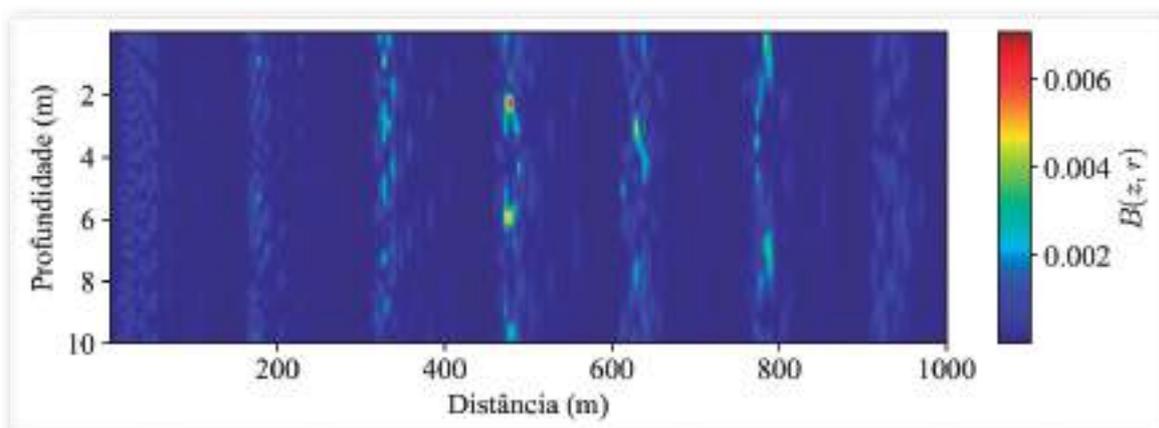


Figura 11 –  $B(z,r)$  para o fundo de calcário, empregando o MI+. Fonte: elaboração própria

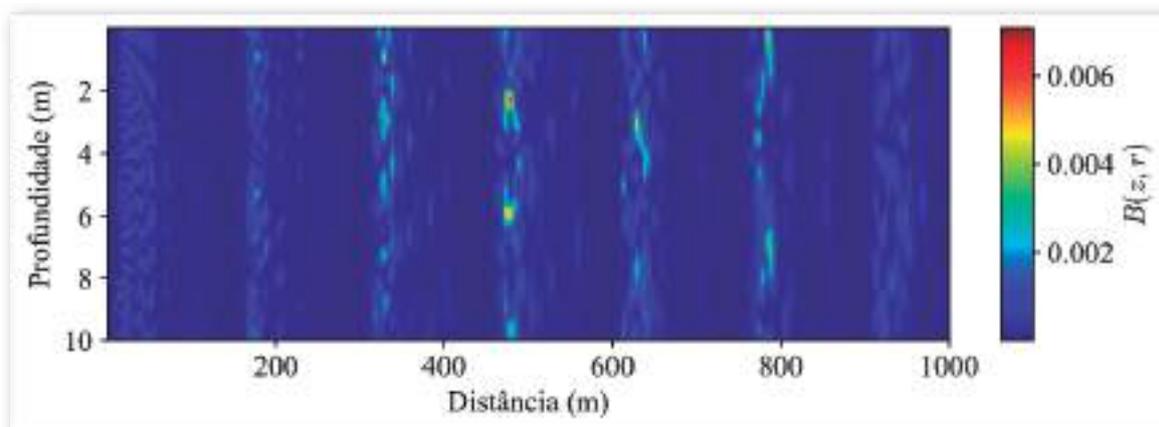


Figura 12 –  $B(z,r)$  para o fundo de basalto, empregando o MI+. Fonte: elaboração própria



Tabela 2. Resultados da localização. Fonte: Elaborado pelo autor

MI	Figura	Fundo	Profundidade (m)	Distância (m)
Clássico	4	-	5,6	472,4
	5	Areia Fina	6,0	477,4
	6	Lama	6,0	477,4
	7	Gravilha	3,5	773,9
Modificado	8	Areia	2,3	477,4
	9	Argila Arenosa	3,5	773,9
	10	Areia Grossa	3,5	773,9
	11	Calcário	2,3	477,7
	12	Basalto	3,0	462,3

As estimativas alcançadas com o MI+ são mostradas a seguir, nas Figuras 13 e 14, para profundidade e distância, respectivamente. Os fundos de areia fina e lama apresentaram os resultados mais precisos, por outro lado, os fundos de areia grossa, gravilha e argila arenosa foram os que tiveram as maiores discrepâncias com relação à distância. Além disso, os fundos de basalto, calcário e areia exibiram precisão somente em distância, embora o fundo de basalto tenha sido o único com resultados diferentes dos demais.

Os resultados precisos obtidos para o fundo de areia fina coincidem com as características reais do fundo do ambiente.



Figura 13 – Estimativas da profundidade (MI+)

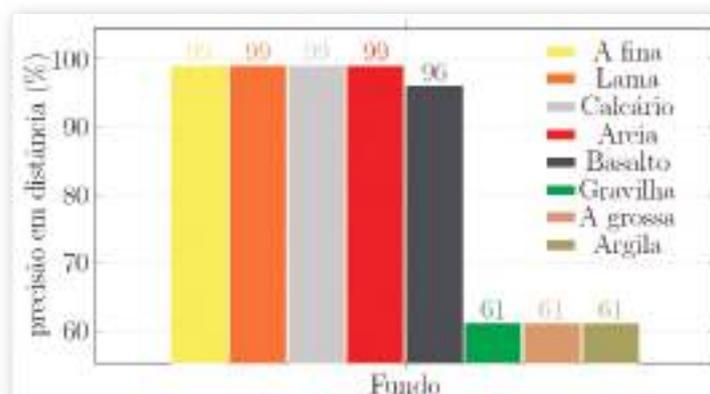


Figura 14 – Estimativas da distância (MI+)



## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentou-se uma técnica baseada no MFP para detecção de fontes de banda larga. A estrutura do MFP foi adotada, com ajustes apenas no mecanismo de geração dos campos complexos de pressão sonora utilizando o MI+.

O MI+ foi implementado considerando o coeficiente de reflexão do fundo elástico, a fim de permitir a criação de réplicas com suas componentes de frequência calculadas para um sinal de banda larga. A geração das réplicas foi realizada variando os parâmetros geométricos de distância e profundidade da fonte. Além disso, foram considerados diferentes tipos de fundos para analisar a eficiência do algoritmo modificado. A precisão do algoritmo foi avaliada em um ambiente raso no litoral de Arraial do Cabo, e demonstrou-se que uma fonte emitindo sinal LFM de banda larga a uma distância de

480 m e profundidade de 6 m poderia ser detectada usando um único hidrofone, bem como usando o estimador proposto.

Adicionalmente, um desafio significativo ocorre quando a batimetria do guia de ondas do experimento apresenta uma ligeira variação com a distância. A profundidade do mar na posição do projetor é de 7 m, enquanto na posição do receptor é de 4 m. No entanto, apesar das limitações associadas à profundidade constante ao longo do alcance, assim como a consideração da velocidade de propagação do som na água do mar constante, o MI+ produziu resultados satisfatórios. A aplicação do MI+ resultou em uma melhoria em relação ao MI clássico, conforme indicado pelos resultados do experimento. Estes resultados sugerem que o método pode ser utilizado para estimativas mesmo em cenários em que o perfil de velocidade do som, as propriedades do fundo e a batimetria não são precisamente conhecidos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, D. A. *Underwater Acoustic Signal Processing: Modeling, Detection, and Estimation*. Springer, 2019.

AUBAUER, R.; LAMMERS, M. O. One-hydrophone method of estimating distance and depth of phonating dolphins in shallow water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 107(5), 2744-2749.

JENSEN, F. B.; KUPERMAN, W. A.; PORTER, M. B.; AND SCHMIDT, H. *Computational ocean acoustics*. Vol. 2011. New York, NY: Springer New York, 2011.

KUPERMAN, WILLIAM A.; LYNCH, JAMES F. Shallow-water acoustics. *Physics Today*, 2004, 57.10: 55-61.

Li, X.; CHEN, H.; LU, H.; BI, X.; & Mo, Y. A method of underwater sound source range estimation without prior knowledge based on single sensor in shallow water. *Frontiers in Physics*, 2023, 11, 53.



LIANG, N.; ZHOU, J.; YANG, Y. Single Hydrophone Passive Source Range Estimation Using Phase-Matched Filter. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10.7 : 866.

RODRIGUEZ, O. "Fundamentos de acústica submarina." 2021.

SOARES, C.; JESUS, S. M. Broadband matched-field processing: Coherent and incoherent approaches. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 113, n. 5, 2003, p. 2587-2598.

WORTHMANN, B. M.; SONG, H. C.; DOWLING, D. R. High frequency source localization in a shallow ocean sound channel using frequency difference matched field processing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 138, n. 6, 2015, p. 3549-3562.

WILMUT, M. J.; CHAPMAN, N. R.; HEARD, G. J.; & EBBESON, G. R. Inversion of Lloyd mirror field for determining a source's track. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2007, 32(4), 940-947.

GOOGLE MAPS. "Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, BR". Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-22.9925148,-42.0222381,12.75z?entry=tту>, 2024. Acessado em: 19 de fevereiro de 2024.21.

