

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA/LAGEMAR
CURSO DE MESTRADO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

VITOR BRAVO PIMENTEL

COMPARAÇÃO ENTRE DADOS BATIMÉTRICOS ADQUIRIDOS COM
ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE E DADOS BATIMÉTRICOS ADQUIRIDOS COM
SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO

NITERÓI, RJ

2018

VITOR BRAVO PIMENTEL

**COMPARAÇÃO ENTRE DADOS BATIMÉTRICOS ADQUIRIDOS COM
ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE E DADOS BATIMÉTRICOS ADQUIRIDOS COM
SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, com ênfase em Hidrografia. Campo de Confluência: Hidrografia e Geofísica.

Orientador:

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto

Niterói, RJ

2018

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG

P644c Pimentel, Vitor Bravo
Comparação entre Dados Batimétricos Adquiridos com
Ecobatímetro Multifeixe e Dados Batimétricos Adquiridos com
Sonar de Varredura Lateral Interferométrico / Vitor Bravo
Pimentel ; Arthur Ayres Neto, orientador. Niterói, 2018.
186 p. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2018.m.05520359717>

1. Hidrografia. 2. Levantamento Hidrográfico. 3. Sonar de
Varredura Lateral. 4. Ecobatímetro Multifeixe. 5. Produção
intelectual. I. Título II. Neto, Arthur Ayres, orientador.
III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de
Geociências.

CDD -

Bibliotecária responsável: Yolle Vacariuc Bittencourt - CRB7/6040

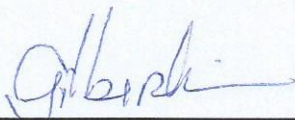
VITOR BRAVO PIMENTEL

**COMPARAÇÃO ENTRE DADOS BATIMÉTRICOS ADQUIRIDOS COM
ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE E DADOS BATIMÉTRICOS ADQUIRIDOS COM
SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFERMÉTRICO**

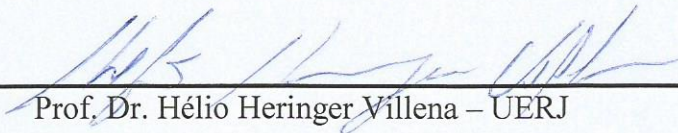
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, com ênfase em Hidrografia. Campo de Confluência: Hidrografia e Geofísica.

Aprovada em 09 de outubro de 2018.

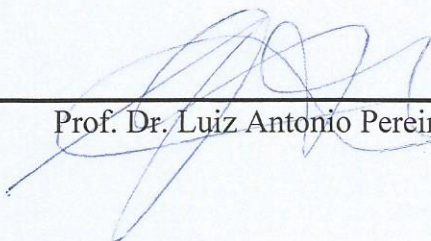
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Gilberto Dias – UFF



Prof. Dr. Hélio Heringer Villena – UERJ



Prof. Dr. Luiz Antonio Pereira de Souza – IPT

NITERÓI, RJ

2018

À Beatriz Fontes de Andrade Pimentel

AGRADECIMENTOS

À Marinha do Brasil, à Diretoria de Hidrografia e Navegação e ao Centro de Hidrografia da Marinha, por me confiarem a missão de buscar novos parâmetros e informações sobre a sempre complexa temática hidrográfica.

À Universidade Federal Fluminense, por me receber e me orientar em meus estudos.

À Empresa *Kongsberg Maritime*, principalmente nas pessoas do Sr. Vicente Carrasco e do Sr. James Baxter, pela sondagem com o sonar de varredura lateral *Geoswath 4R* e por estarem sempre à disposição quando precisei.

Ao Navio de Pesquisa Hidroceanográfico Vital de Oliveira, principalmente nas pessoas de seu Comandante, o Capitão de Fragata Alex Urbangc, seu Imediato, o Capitão de Fragata Fernando José, seu Chefe de Operações, o Capitão de Corveta Elides, seu Encarregado da Divisão de Hidrografia, o Capitão-Tenente Sabroza e ao oficial da Divisão de Hidrografia, o Primeiro-Tenente Dubeaux. Agradeço pelo apoio e pelos agradáveis momentos a bordo da lancha CEHILI.

Aos professores do LAGEMAR, em especial aos professores Arthur Ayres Neto e André Belém, pela orientação sempre segura e pelo tempo gasto com meu aprendizado.

Aos seguintes oficiais da Marinha do Brasil: ao Contra-Almirante Augusto e ao Capitão de Mar e Guerra Sebastião, por terem me permitido seguir o rumo que conduziu a elaboração desse trabalho. Aos Capitães de Fragata Adriano e Rodrigo Carvalho, pelo apoio incondicional. Aos Capitães de Corveta Douglas Luís e Peçanha, por terem me orientado tanto na parte hidrográfica quanto na acadêmica. Ao Capitão-Tenente Soriano, Primeiro-Sargento Sérgio Vieira e aos Segundos-Sargentos Aguiar, Wander e Eugênio, pois sem eles a sondagem não teria acontecido. À Primeiro-Tenente Passamani, pelas informações prestadas. Agradeço ainda, de maneira especial, ao Capitão de Corveta Christopher, por ter dividido comigo as incertezas que o caminho de investigação científica pressupõe.

Por fim agradeço à minha esposa Beatriz, por suportar a ausência que a dedicação ao estudo requer e mesmo assim me apoiar incondicionalmente. Aos meus pais Júlio e Jupira e ao meu irmão Otávio, por me encorajarem a seguir esse caminho.

*Combati o bom combate, acabei a carreira,
guardei a fé.*

Paulo, o Apóstolo

RESUMO

Levantamentos hidrográficos são complexos processos de investigação do meio marítimo, lacustre ou fluvial. Requerem uma intrincada combinação de sensores e informações, sendo a fonte primordial para a confecção das cartas náuticas. Estas, por sua vez, são fundamentais para uma navegação segura, tendo importantes desdobramentos econômicos, judiciais e militares. Para que sejam geradas cartas náuticas seguras e confiáveis, em processos que visam a diminuição de tempo e custos dispendidos, diversas alternativas vêm sendo levantadas, dentre elas o uso do sonar de varredura lateral interferométrico. Atualmente, o levantamento batimétrico tem como seu principal sensor o ecobatímetro multifeixe, pois este consegue fazer o imageamento completo do fundo marinho e conseqüentemente mapear as menores profundidades com grande precisão e acurácia. Nesse contexto, o sonar de varredura lateral interferométrico surge como opção, contudo ainda existe a controvérsia se é possível alcançar resultados tão confiáveis quanto aos do ecobatímetro multifeixe. Apesar de ambos utilizarem acústica e interferometria em suas tecnologias, a forma de aquisição e processamento diferem, o que pode vir a trazer alterações nos produtos finais. Assim, este trabalho analisa as duas tecnologias, seus princípios de funcionamento e os efeitos a que estão sujeitos. Por fim, é feito um levantamento hidrográfico na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, com os dois sensores, concomitantemente, e seus resultados são amplamente discutidos à luz das normas internacionais e nacionais vigentes.

Palavras-chave: Hidrografia. Levantamento Hidrográfico. Sonar de Varredura Lateral. Ecobatímetro Multifeixe.

ABSTRACT

Hydrographic surveys are complex processes of maritime, lacustrine or fluvial environment investigation. They require an intricate combination of sensors and information, being the primary source for the nautical charts. They are fundamental for a safe navigation, having important economics, judicial and militaries consequences. To generate safe and reliable nautical charts, in a process that aim to reduce the time and costs spent, several alternatives have been raised, among them the use of interferometric sidescan sonar. Nowadays, the bathymetric survey has as its main sensor the multibeam echosounder, because it manages the full image of the sea bottom and consequently to map the smallest depths with great precision and accuracy. In this context, interferometric sidescan sonar is an option, however there is still a controversy whether it is possible to achieve results as reliable as those with the multibeam echosounder. Although both use acoustics and interferometry in their technologies, the way of acquisition and processing differ, which may bring changes in the final products. Thus, this work analyzes the two technologies, their principles of operation and the effects to which they are subject. Finally, a hydrographic survey is carried out in Guanabara Bay – Rio de Janeiro, with the two sensors and its results are widely discussed based on current international and national standards.

Keywords: Hydrography. Hydrographic Survey. Sidescan Sonar. Multibeam Echosounder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Atitude da plataforma de sondagem.....	4
Figura 2 – Comparação entre o traçado do raio à velocidade constante e considerando a estratificação em camadas.....	5
Figura 3 – Informações necessárias para um levantamento batimétrico	7
Figura 4 – Detecção do ecobatímetro multifeixe utilizando o princípio do <i>beam forming</i> e a técnica do <i>mills cross</i>	10
Figura 5 – Desenho esquemático do funcionamento de um sonar de varredura lateral interferométrico com 2 receptores (A e B) com uma distância entre ambos ($a = n \cdot \lambda$).....	11
Figura 6 – Desenho esquemático de dois elementos de um mesmo <i>array</i> recebendo a informação da mesma feição em instantes diferentes.....	16
Figura 7 - Chegada da frente de onda ao transdutor.....	16
Figura 8 – Detecção em fase.	17
Figura 9 – Detecção em fase com diferentes comprimentos de onda.....	17
Figura 10 – Detecção em fase em sensores com diferente espaçamento entre os elementos receptores	19
Figura 11 – Exemplo de diferentes <i>arrays</i> com elementos espaçados entre $\lambda/2$, 5λ e 10λ	20
Figura 12 – Disposição dos feixes de transmissão e recepção durante a técnica do <i>mills cross</i>	21
Figura 13 – Diagrama de Torta e Tempo-Ângulo.	22
Figura 14 – <i>Footprints</i> de acordo com o <i>grazing angle</i>	23
Figura 15 – Eco de retorno sendo processado por WMT	24
Figura 16 – Detecção por BDI.....	25
Figura 17 – Detecção de um ponto difrator por mais de um canal.....	26
Figura 18 – Canal de um receptor de <i>array</i> linear para detecção em fase.....	27
Figura 19 – Detecção por fase.....	27
Figura 20 – HDBF	29
Figura 21 – Métodos de detecção diferente dentro de uma mesma superfície	30
Figura 22 – Desenho esquemático de sonar de varredura lateral	31
Figura 23 – Método Vernier.....	32
Figura 24 – Efeito do ruído adicional na detecção	33
Figura 25 – <i>Baseline Decorrelation Effect</i>	34

Figura 26 – Incerteza da profundidade em função da distância nadiral e do ângulo oblíquo devido à falta de correlação entre as linhas de base	35
Figura 27 – <i>Shifting Footprint Effect</i>	36
Figura 28 – Modelos de incerteza da medida de diferença de fase em função da distância nadiral e do ângulo oblíquo.....	37
Figura 29 – <i>Layover</i> e <i>nadir gap</i>	37
Figura 30 – Desenho esquemático do efeito de <i>layover</i>	38
Figura 31 – Superfície batimétrica gerada a partir de dados adquiridos com PDBS, ressaltando o <i>nadir gap</i>	38
Figura 32 – Baía de Guanabara e as áreas a serem realizados os testes	42
Figura 33 – Áreas do <i>patch test</i>	43
Figura 34 – Área 1	45
Figura 35 – Área 2	46
Figura 36 – Área 3	47
Figura 37 – Área 4	48
Figura 38 – Área 5	49
Figura 39 – Lancha CEHILI sendo retirada do NPqHo Vital de Oliveira para ser posta na água	50
Figura 40 – Sonar de varredura lateral Geoacustics Geoswath 4R instalado em haste	51
Figura 41 – Lancha CEHILI com a haste instalada.....	52
Figura 42 – Pontos nos quais foram adquiridos os perfis de velocidade do som e Estações Maregráficas utilizadas	55
Figura 43 – Estado do mar	56
Figura 44 – Aumento da superfície ensonificada com o feixe de acordo com o aumento da profundidade, considerando a largura do feixe constante.....	59
Figura 45 – Gráfico de peso x distância.....	60
Figura 46 – Gráfico de peso x <i>grazing angle</i>	60
Figura 47 – Incerteza da profundidade aumentado de acordo com a distância de sua posição inicial.....	62
Figura 48 – Incerteza da profundidade aumentado de acordo com a distância de sua posição inicial.....	62
Figura 49 – Cálculo de hipóteses de acordo com o <i>pseudo-time</i>	63
Figura 50 – Métodos de desambiguidade do CUBE.....	64
Figura 51 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m.....	71

Figura 52 – Gráfico demonstrando as fontes de incerteza de cada sensor para a área 1	73
Figura 53 – Imagens do <i>subset editor</i> para a sondagem multifeixe	74
Figura 54 – Imagens do <i>subset editor</i> para a sondagem PDBS.....	75
Figura 55 – Perfil com o <i>subset editor</i> na sondagem multifeixe.....	76
Figura 56 – Perfil com o <i>subset editor</i> na sondagem com o interferométrico	77
Figura 57 – Camadas de superfícies da área 1 criadas a partir das equações 3 e 5.....	79
Figura 58 – Incerteza amostral do nó em uma superfície da área 1 de resolução de 0,3 m ²	79
Figura 59 – Camadas de superfícies da área 1 criadas a partir das equações 3 e 5.....	80
Figura 60 – Camada de superfície resultante da equação 6	80
Figura 61 – Superfícies diferenças para a área 1	82
Figura 62 – Área do perfil 1	83
Figura 63 – Perfil 1	83
Figura 64 – Área do perfil 2	84
Figura 65 – Perfil 2	84
Figura 66 – Área perfil 3.....	85
Figura 67 – Perfil 3	85
Figura 68 – Área perfil 4.....	86
Figura 69 – Perfil 4	86
Figura 70 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m.....	91
Figura 71 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade do PDBS.....	91
Figura 72 – Gráfico demonstrando as fontes de incerteza de cada sensor para a área 2	92
Figura 73 – Área observada por meio do <i>subset editor</i> para uma sondagem com o MBES....	93
Figura 74 – Área observada por meio do <i>subset editor</i> para uma sondagem com o PDBS.....	94
Figura 75 – Camadas de superfícies da área 2 criadas a partir das equações 3 e 5.	95
Figura 76 – Camadas de superfícies da área 2 criadas a partir das equações 3 e 5.....	95
Figura 77 – Camada de superfície resultante da equação 6	96
Figura 78 – Superfície diferença da camada <i>Depth</i> para a área 2.	97
Figura 79 – Superfície diferença da camada <i>Shoal</i> para a área 2.....	97
Figura 80 – Área do perfil 1	98
Figura 81 – Perfil 1	98
Figura 82 – Área do perfil 2	99
Figura 83 – Perfil 2	99
Figura 84 – Área do perfil 3.....	100

Figura 85 – Perfil 3	100
Figura 86 – Efeito de ambiguidade em regiões inclinadas	102
Figura 87 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade do MBES	105
Figura 88 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade do PDBS	105
Figura 89 – Gráfico demonstrando as fontes de incerteza de cada sensor para a área 3	106
Figura 90 – Imagem do <i>subset editor</i> na sondagem com o MBES	107
Figura 91 – Imagem da mesma área na sondagem com o PDBS	108
Figura 92 – Camadas de superfícies da área 3 criadas a partir das equações 3 e 5	109
Figura 93 – Camadas de superfícies da área 3 criadas a partir das equações 3 e 5	109
Figura 94 – Camada de superfície resultante da equação 6	109
Figura 95 – Superfície diferença da camada <i>Depth</i> para a área 3.	111
Figura 96 – Superfície diferença da camada <i>Shoal</i> para a área 3.	111
Figura 97 – Área do perfil 1	112
Figura 98 – Perfil 1	113
Figura 99 – Área perfil 2	113
Figura 100 – Perfil 2	114
Figura 101 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade do MBES	118
Figura 102 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade do PDBS	118
Figura 103 – Gráfico demonstrando as fontes de incerteza de cada sensor para a área 4	119
Figura 104 – Popa do casco soçobrado na sondagem com o MBES	120
Figura 105 – Popa do casco soçobrado na sondagem com o PDBS	121
Figura 106 – Perfil longitudinal do casco, na sondagem multifeixe	122
Figura 107 – Perfil longitudinal do casco, na sondagem com o interferométrico	123
Figura 108 – Camadas de superfícies da área 4 criadas a partir das equações 3 e 5	124
Figura 109 – Camadas de superfícies da área 4 criadas a partir das equações 3 e 5	124
Figura 110 – Camada de superfície resultante da equação 6	125
Figura 111 – Superfície diferença da camada <i>Depth</i> para a área 4	126
Figura 112 – Superfície diferença da camada <i>Shoal</i> para a área 4	127
Figura 113 – Área do perfil 1	127
Figura 114 – Perfil 1	128

Figura 115 – Área do perfil 2	129
Figura 116 – Perfil 2	129
Figura 117 – Área perfil 3	130
Figura 118 – Perfil 3	131
Figura 119 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m.....	134
Figura 120 – Camadas <i>Depth</i> das superfícies MBES (esq.) e PDBS (dir.)	135
Figura 121 – Área dos perfis	136
Figura 122 – Camada <i>Depth</i> da superfície PDBS	136
Figura 123 – Perfil 1	137
Figura 124 – Perfil 2	137
Figura 125 – Perfil 3	138
Figura 126 – Setores dos perfis	139
Figura 127 – Setores dos perfis com vista mais próxima	139
Figura 128 – Perfil setor 1	140
Figura 129 – Perfil setor 2.....	140
Figura 130 – Perfil setor 3.....	141
Figura 131 – Perfil 1	142
Figura 132 – Perfil 1	142
Figura 133 – Perfil 2	143
Figura 134 – Perfil 2	143
Figura 135 – Imagens da camada <i>Depth</i> das superfícies MBES (esq.) e PDBS (dir)	147
Figura 136 – Imagens da camada <i>Depth</i> das superfícies MBES (esq.) e PDBS (dir)	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações para a batimetria dentro de um Levantamento Hidrográfico	8
Tabela 2 – Coordenadas das áreas do <i>patch test</i>	44
Tabela 3 – Coordenadas e tença da área 1	45
Tabela 4 – Coordenadas e tença da área 2	46
Tabela 5 – Coordenadas e tença da área 3	47
Tabela 6 – Coordenadas e tença da área 4	48
Tabela 7 – Coordenadas e tença da área 5	49
Tabela 8 – Lançamento SVP	54
Tabela 9 – Dados informativos da área 1, relativos à precisão e relativos à acurácia.....	70
Tabela 10 – Dados informativos da área 2, relativos à precisão e relativos à acurácia.....	90
Tabela 11 – Dados informativos da área 3, relativos à precisão e relativos à acurácia.....	104
Tabela 12 – Dados informativos da área 4, relativos à precisão e relativos à acurácia.....	117
Tabela 13 – Dados informativos da área 5.....	133
Tabela 14 – Diferentes resoluções para a área 1, sendo correlacionadas a densidade média de <i>pings</i> por nó e a quantidade de células, nas superfícies MBES e PDBS	146
Tabela 15 - Diferentes resoluções para a área 4, sendo correlacionadas a densidade média de <i>pings</i> por nó e a quantidade de células, nas superfícies MBES e PDBS	148
Tabela 16 – Sugestão de área para sondagem com o PDBS	154

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i>
LH	Levantamentos Hidrográficos
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
OHI	Organização Hidrográfica Internacional
S-44	Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos
NORMAM 25	Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos
SPECS	<i>Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
CHS	<i>Canadian Hydrographic Service</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
NORMAM-25 REV. 2	Segunda Revisão da NORMAM 25
WGS-84	<i>World Geodetic System</i> estabelecido em 1984
MLWS	<i>Mean Low Water Springs</i>
CTD	<i>Conductivity, Temperature and Depth</i>
TWTT	<i>Two Way Travel Time</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i>
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicle</i>
ROV	<i>Remoted Operated Vehicle</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
IVT	Incerteza Vertical Total
MBES	<i>Multibeam Echosounder</i>
SVL	Sonar de Varredura Lateral
SSS	<i>Sidescan Sonar</i>
PDBS	<i>Phase Differencing Bathymetric Sonar</i>
PMBS	<i>Phase-Measuring Bathymetric Sidescan</i>
$\Delta\phi_{AB}$	Diferença de fase entre os receptores A e B

λ	Comprimento de onda de um sinal e Longitude
γ	Ângulo entre o eixo do interferômetro e a direção do raio
θ	Obliquidade
TOA	<i>Time of Arrival</i>
DOA	<i>Direction of Arrival</i>
WMT	<i>Weighted Mean Time</i>
BDI	<i>Bearing Direction Indicator</i>
HDBF	<i>High Definition Beam Forming</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
BB	Bombordo
BE	Boreste
dB	Decibel
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
KHz	Kilohertz
ms	Microsegundos
USGS	<i>United States Geological Service</i>
UFF	Universidade Federal Fluminense
φ	Latitude
NPqHo	Navio de Pesquisas Hidroceanográfico
S	Sul
W	Oeste
F41	Ficha descritiva de uma Estação Maregráfica
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
TPU	<i>Total Propagated Uncertainty</i>
CUBE	<i>Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator</i>
GSF	<i>Generic Sensor Format</i>
HzTPU	<i>Horizontal TPU</i>
DpTPU	<i>Depth TPU</i>
σ	Desvio Padrão
IPT	Incerteza Propagada Total

IHT	Incerteza Horizontal Total
IVT	Incerteza Vertical Total
QC	<i>Quality Control</i>
μ	Média
Eq.	Equação
SW	Sudoeste
NE	Nordeste
NW	Noroeste
SE	Sudeste
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.....	1
1.2 PRECISÃO EM LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO.....	2
1.3 ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE E SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO	9
1.4 OBJETIVO DA PESQUISA.....	12
1.5 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	12
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 O QUE É INTERFEROMETRIA	14
2.2 INTERFEROMETRIA NA BATIMETRIA	15
2.3 DETECÇÃO NO ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE.....	20
2.3.1 WMT.....	23
2.3.2 BDI	24
2.3.3 Diferenciação de fase.....	27
2.3.4 HDBF.....	28
2.3.5 Conclusão sobre os métodos	29
2.4 DETECÇÃO NO SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO	30
2.4.1 Ruído adicional.....	32
2.4.2 Falta de correlação entre as linhas de base	34
2.4.3 Efeito da mudança de <i>footprint</i>	35
2.4.4 Ambiguidade de mesma distância (<i>layover</i>) e espaço do nadir (<i>nadir gap</i>).....	37
2.5 COMPARAÇÃO ENTRE ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE E SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO	39
3. METODOLOGIA.....	41
3.1 PLANEJAMENTO E ÁREA DOS TESTES.....	41
3.1.1 <i>Patch Test</i>	43
3.2 TESTE DE DETECÇÃO DE ALVOS – ÁREA 1	44
3.2.1 Teste de inclinação – Área 2	45
3.2.2 Teste de detecção de objetos projetados para fora do mar – Área 3	46
3.2.3 Teste de detecção objetos naufragados – Área 4.....	47
3.2.4 Teste de eficiência – Área 5	49
3.2.5 Teste de resolução	50

3.3	AQUISIÇÃO DOS DADOS	50
3.3.1	Sonares e periféricos	51
3.3.2	Perfil de velocidade do som	53
3.3.3	Maré	55
3.3.4	Condições de tempo	56
3.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS	56
3.5	<i>PATCH TEST</i>	58
3.6	INTERPOLADORES DE SUPERFÍCIES	59
3.7	CONTROLE DE QUALIDADE	65
3.7.1	Precisão	66
3.7.2	Acurácia	68
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	ÁREA 1 – TESTE DE DETECÇÃO DE ALVOS	70
4.1.1	Precisão	71
4.1.2	Acurácia	81
4.1.3	Análise de perfil de feições-alvos – rochas	82
4.1.4	Conclusões área 1	87
4.2	ÁREA 2 – TESTE DE INCLINAÇÃO	89
4.2.1	Precisão	92
4.2.2	Acurácia	96
4.2.3	Análise das feições-alvos – mudança de gradiente do fundo marinho	98
4.2.4	Conclusão área 2	101
4.3	ÁREA 3 – TESTE DE DETECÇÃO DE OBJETOS PROJETADOS PARA FORA DO MAR	103
4.3.1	Precisão	105
4.3.2	Acurácia	110
4.3.3	Análise das feições-alvos – pilares da Ponte Rio-Niterói	112
4.3.4	Conclusão área 3	115
4.4	ÁREA 4 – TESTE DE DETECÇÃO DE OBJETOS NAUFRAGADOS	116
4.4.1	Precisão	119
4.4.2	Acurácia	125
4.4.3	Análise das feições-alvos – casco soçobrado	127
4.4.4	Conclusão área 4	131
4.5	ÁREA 5 – TESTE DE EFICIÊNCIA	132
4.5.1	Primeira faixa – 25,2 m à 15 m	135

4.5.2	Segunda faixa – 15 m à 5 m	138
4.5.3	Terceira faixa – 5 m à 2 m	141
4.5.4	Conclusões área 5 – eficiência	143
4.6	RESOLUÇÃO	145
4.6.1	Conclusões do teste de resolução	150
4.7	CONCLUSÕES GERAIS QUANTO AO USO DO SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO.....	152
5.	CONCLUSÕES	155
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	155
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	157
6.	BIBLIOGRAFIA	158

1. INTRODUÇÃO

1.1 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

Levantamentos Hidrográficos (LH) são, de acordo com a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN)¹ (2017), uma série de atividades para coleta de dados de matizes batimétricos, geomorfológicos, geofísicos, maregráficos, topográficos, oceanográficos ou geodésicos que podem ser realizadas em áreas marítimas ou fluviais, englobando ainda os ambientes lacustres, canais naturais ou artificiais, desde que essas atividades não tenham cunho apenas de pesquisa pura ou aplicada.

Para garantir que os dados coletados em um Levantamento Hidrográfico fiquem dentro de uma determinada margem de erro, a Organização Hidrográfica Internacional (OHI) estabelece valores mínimos que são aceitáveis (OHI, 2008) e as boas práticas para sua execução (OHI, 2005), de forma que sirvam de guia para que cada país signatário possa elaborar suas próprias especificações no que tange à exatidão dos dados levantados. A preocupação internacional com a coleta de dados não é um tópico recente, tendo a primeira reunião sobre discussão dos parâmetros técnicos ocorrido na VII Conferência Hidrográfica Internacional em 1957, com a primeira edição de uma publicação técnica (S-44 - Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos) sendo divulgada em 1968 (OHI, 2008). Atualmente, a S-44 se encontra em sua quinta edição e já existem avançadas tratativas para a próxima revisão (GEBCO GROUP, 2017).

Diversos países parametrizaram suas atividades a partir de normas internas, como o Brasil a partir das Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos – NORMAM 25 (DHN, 2017), o Estados Unidos através da *Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables (SPECS)* (NOAA, 2017) e da *Engineering and Design Hydrographic Surveys* (USACE, 2013), o Canadá por meio da *Canadian Hydrographic Service Standards for Hydrographic Surveys* (CHS, 2008), dentre outros.

O principal objetivo do levantamento hidrográfico é aquisição de dados para que sejam compilados em forma de documentos náuticos (DHN, 2017; OHI, 2005). Levantamentos hidrográficos estão fortemente associados a aplicações práticas, tendo como fim: subsidiar proposta de definição ou alteração dos parâmetros operacionais de navegação de portos e

¹ A DHN exerce, dentre outras funções, as atribuições do Serviço Hidrográfico brasileiro, segundo Decreto-Lei nº 243/1967 (BRASIL, 1967).

terminais portuários; subsidiar projeto de estabelecimento ou alteração permanente de auxílios à navegação; atualização de batimetria; georreferenciar quaisquer obras sobre ou sob águas; posicionar pontos notáveis e sinais de auxílios à navegação (DHN, 2017). Dessa forma, contribui para a navegação marítima e gestão de tráfego, operações navais, administração de zonas costeiras, preservação do meio marinho, exploração de recursos marinhos e instalação de cabos/oleoduto, definição de fronteiras marítimas e estudos científicos (OHI, 2005).

Dentre os documentos náuticos existentes, a carta náutica é de singular importância ao navegante (OHI, 2005), pois se destina à segurança da navegação (DHN, 2017), sendo o produto final de um levantamento hidrográfico (OHI, 2005). Apresenta informações sobre profundidades, perigos à navegação, natureza do fundo, dentre outras (MIGUES, 1996). Ou seja, é um banco de dados compilado que se destina a atender às necessidades da navegação marítima (IMO, 2014). A carta náutica será tão exata e precisa quanto forem os levantamentos que a deram origem (MIGUES, 1996; OHI, 2005) denotando a importância de um processo cada vez mais preciso e acurado.

Sem cartas náuticas corretas ou acuradas, a segurança da navegação não é possível (LAPPALAINEN; STORGÁRD; TAPANINEN, 2013), afeta diretamente o processo de avaliação de riscos por ocasião da contratação de seguro para as embarcações (SARRABEZOLE; LASSERRE; HAGOUAGN'RIN, 2016), influenciando, assim, o custo de quaisquer atividades que dependam do modal marítimo (WILLIANS, 1980).

Soma-se a todo esse processo, o fator de não perenidade das características levantadas, sendo necessário refazer o levantamento de áreas dantes já pesquisadas com uma periodicidade a ser definida pela Autoridade Marítima local (OHI, 2008).

Com isso, vislumbra-se um processo de vital importância para qualquer país que é o de desenvolvimento de uma política marítima nacional, que se inicia, através da hidrografia (OHI, 2005), com o levantamento hidrográfico, e culmina na produção de documentos diversos, mormente o náutico, sendo a carta náutica sua maior expressão.

1.2 PRECISÃO EM LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO

Como expressado no item anterior, um levantamento hidrográfico pode coletar dados de vários matizes. Dentre estes, um de fundamental importância para a carta náutica são os dados batimétricos (KOPACZ; MORGAS; URBANSKI, 1998). Dados de batimetria são dados

de profundidade de determinada área (KOPACZ; MORGAS; URBANSKI, 1998), de forma que um modelo batimétrico do fundo marinho é equivalente a um modelo topográfico de uma área emersa (OHI, 2008). Em prol de se obter a batimetria precisa de um local, diversos equipamentos devem estar interligados, cada um fornecendo uma informação que possibilitará a confecção da carta náutica (OHI, 2005) dentro das incertezas preconizadas pela NORMAM-25 REV. 2 (DHN, 2017). Abaixo, serão tratados os principais sensores auxiliares e as informações que estes fornecem, sem, contudo, esgotar todas as possíveis fontes de erro (OHI, 2005).

Inicialmente, as informações de profundidade necessitam ser georreferenciadas, ou seja, precisam ter informações que possam localizá-las espacialmente na superfície terrestre, de modo a poder estabelecer, sem ambiguidade, suas coordenadas em relação a uma superfície de referência (OHI, 2005). A superfície de referência mais utilizada para coordenadas horizontais é o elipsóide de revolução. Uma vez que essa superfície esteja fixa e posicionada no espaço, tem-se o *datum* horizontal. Em levantamentos hidrográficos, o mais utilizado é o *World Geodetic System* estabelecido em 1984 – WGS-84. Como este é geocêntrico, suas coordenadas tem que ser adquiridas por meio de satélites e geralmente estão representadas na forma elipsoidal ou geodésica (latitude e longitude) ou retangular (Gauss) (OHI, 2005).

Outro fator que vem integrar a problemática dos dados batimétricos é a escolha e o cálculo de um referencial vertical. A questão do referencial horizontal já foi resolvida na escolha do *datum* das coordenadas recebidas via satélite, contudo, o referencial vertical ou *datum* vertical é diferente do anterior, dependendo das variações de maré² (OHI, 2005). Faz-se necessário um monitoramento contínuo desta, de forma a se estabelecer um plano horizontal que sirva de referência, sendo este conhecido como nível de redução de sondagens (FRANCO, 2009), de forma a poder relativizar as profundidades à esse nível (OHI, 2005). No caso do Brasil, o referencial escolhido é MLWS³ (MIGUES, 1996). Assim, toda medição de profundidade deve ser referenciada a este plano (HICKS, 2006).

Entretanto, deve-se considerar que a plataforma utilizada para a coleta dos dados não é uma superfície estabilizada, havendo um movimento da embarcação que está sendo utilizada para sondagem. Esta se movimenta de forma rotacional em 3 eixos ortogonais convencionados,

² O termo maré, para fins hidrográficos, representa qualquer variação vertical no nível da superfície da água, seja ela proveniente de rios, lagos ou mar (OHI, 2005).

³ MLWS ou *Mean Low Water Springs* é um valor calculado com base nas forças astronômicas da maré de cada local. Equivale, aproximadamente, à média das baixa-mares de sizígia (MIGUENS, 1996).

consistindo no que se denomina atitude da embarcação. Os movimentos que compõem a atitude de uma plataforma são *roll*/balanço, *pitch*/cabeceio e *heading/yaw*/proa, somando-se ainda o *heave*/arfagem (OHI, 2005). O primeiro é o movimento angular em torno do eixo longitudinal da embarcação, o segundo é o movimento angular em torno do eixo transversal, o terceiro é o movimento angular em torno do eixo vertical à embarcação e o quarto é o movimento linear ao longo desse eixo (Figura 1) (OHI, 2005). Esses movimentos devem ser monitorados através de um sensor de movimento⁴, pois a atitude da plataforma muda a cada instante (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000). Para tal, em conjunto com os sensores batimétricos e de posição satélite, é necessário o uso de um sensor de movimento que possa fazer a medição de atitude e arfagem na plataforma de sondagem (OHI, 2005), por ocasião do momento de transmissão e da recepção (BEAUDOIN; HUGHES CLARKE; BARTLETT, 2004).

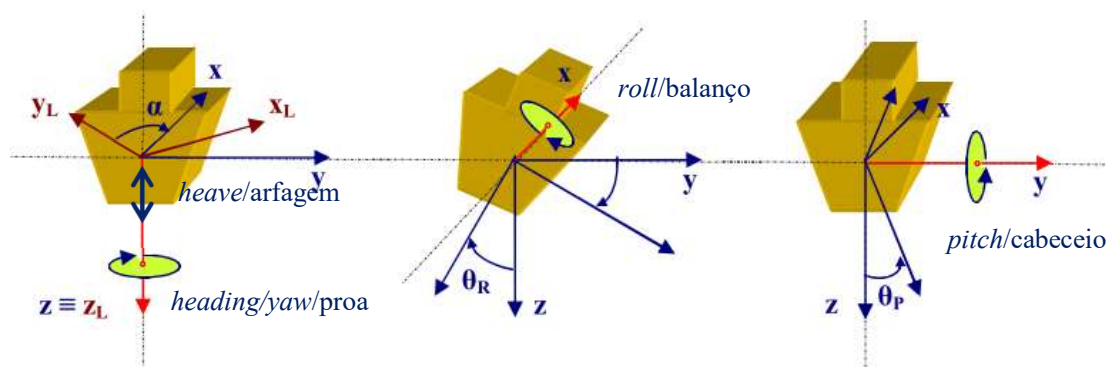


Figura 1 – Atitude da plataforma de sondagem. Da esquerda para a direita: 1. Movimento linear de *heave*/arfagem e movimento angular de *heading/yaw*/proa. 2. Movimento linear de *roll*/balanço. 3. Movimento linear de *pitch*/cabeceio. Fonte: adaptado de OHI (2005).

Com relação às propriedades da água, deve-se considerar que elas não são perenes, nem espacialmente e nem temporalmente. A velocidade do som na água e o conseqüente caminho que o feixe sonoro percorre para atingir o fundo marinho e retornar à superfície variam de acordo com a densidade, que por sua vez varia de acordo com a pressão, salinidade e temperatura da massa de água (DE MOUSTIER, 1988; L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000). Como estas propriedades mudam em diferentes escalas de tempo, é requerido um monitoramento periódico, tanto temporal como espacial, da velocidade do som

⁴ Atualmente, os sensores de movimento são compostos por sensores inerciais e um par de sensores GPS (OHI, 2005).

na coluna d'água (OHI, 2005). A velocidade do som na água não se mantém constante em direção ao fundo quando houver estratificações de massas d'água com diferentes características. Para contemplar essa variação, o monitoramento da velocidade do som na coluna d'água deve ser realizado seguindo essa estratificação em camadas⁵, onde cada uma terá espessura e velocidade representativa (Figura 2) de acordo com a medição realizada (OHI, 2005; L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000). Quanto menor a espessura da camada, mais preciso será o modelo de traçado de raio. A partir de tal procedimento se faz possível o cálculo do traçado e da velocidade de cada feixe. Assim, tendo o caminho do raio e do tempo que foi levado para percorrer este caminho (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000), calcula-se a distância percorrida e conseqüentemente a profundidade (OHI, 2005). A velocidade do som na coluna d'água pode ser calculada por meio de medição direta, através de um perfilador de velocidade do som ou indireta, sendo esta deduzida a partir de equações dependentes da pressão, salinidade e temperatura com um CTD (equipamento cujo nome vem das iniciais das palavras *Conductivity, Temperature e Depth*) (OHI, 2005).

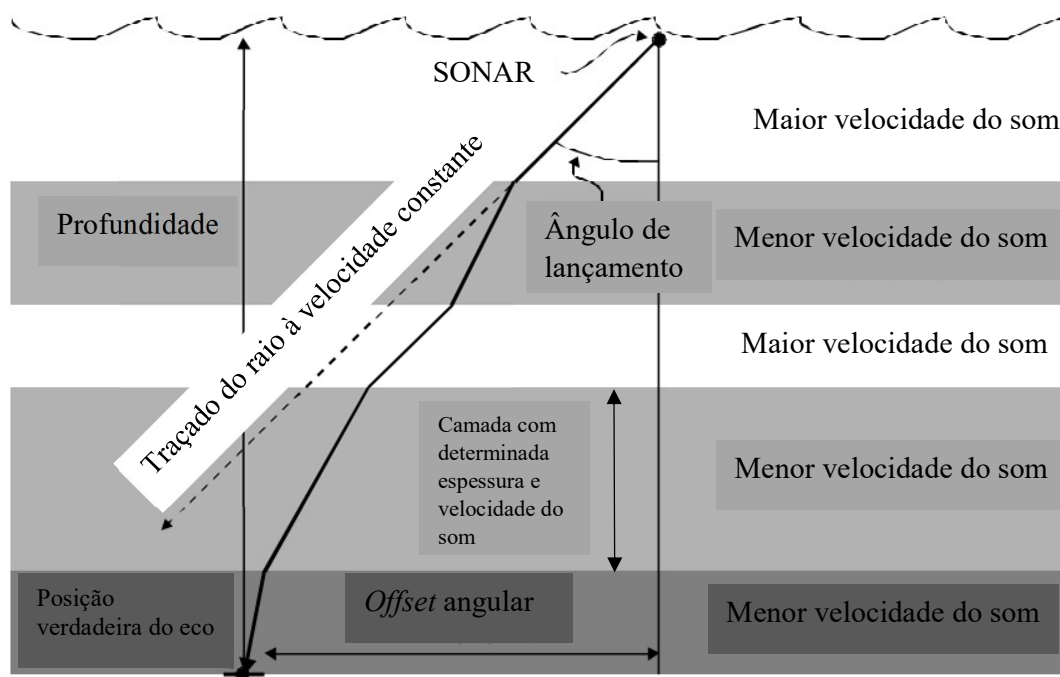


Figura 2 – Comparação entre o traçado do raio à velocidade constante e considerando a estratificação em camadas. Fonte: adaptado de L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS (2000).

⁵ Cada camada tem um tamanho e velocidade representativa. Assim, pode-se ter camada 1 (superfície) com 0,1 m de espessura e velocidade de 1530 m/s, a camada 2 com espessura de 0,3 m e velocidade 1528 m/s. Tal procedimento ocorrerá até a última camada (fundo marinho).

O transdutor é o dispositivo que irá gerar o pulso acústico a partir de uma célula piezoelétrica (OHI, 2005). Quando a frente de onda sonora é gerada, esta é produzida em um ambiente no qual o transdutor está inserido e, deste meio, passa a se propagar na água. A mudança de ambientes gera variações na direção de propagação, principalmente se o transdutor tiver a face plana. Levando tal fato em consideração, deve ser realizado um monitoramento contínuo da velocidade do som na água na altura da face do transdutor, pois a partir deste procedimento pode-se estimar qual a mudança de ângulos resultante da troca dos meios (OHI, 2005).

Por último, o tempo que o raio sonoro leva para fazer o caminho de ida e volta entre o transdutor e o fundo marinho (TWTT – *Two Way Travel Time*) e o ângulo do feixe são calculados pelo sensor batimétrico (BEAUDOIN; HUGHES CLARKE; BARTLETT, 2004). Existem vários tipos de sensores que fornecem informação indireta de batimetria, tais como: ecobatímetros monofeixe, ecobatímetros multifeixe, sonares de varredura lateral interferométrico⁶, LIDAR (*Light Detection And Ranging*) e imagens satélites. Os três primeiros tem seus princípios baseados no deslocamento do feixe sonoro, enquanto os dois últimos tem seus princípios lastrados na propagação de feixes eletromagnéticos (OHI, 2005). Importante ainda citar que eles podem ser utilizados de diversas plataformas: aerotransportados (LIDAR); em plataformas flutuantes tipo navio (OHI, 2005) e USV (*Unmanned Surface Vehicle*) (BIBULI et al., 2014; JIN et al., 2016); ou em meios submarinos (UUV – *Unmanned Underwater Vehicle*) (OHI, 2005), como os sistemas fixos (em boias), rebocados ou autopropelidos (ROV – *Remotely Operated Vehicle* e AUV – *Autonomous Underwater Vehicle*) (FLORIANI, 2013).

⁶ O termo sonar de varredura lateral interferométrico é uma tradução literal da expressão análoga inglesa *interferometric sidescan sonar*. Tanto essa terminologia, como sua variante “sistemas interferométricos”, são usadas ao se referirem à equipamentos sonares de visada lateral que empregam técnicas de interferometria na busca por informações batimétricas (BONGIOVANNI; SCHMIDT, 2016; SAUCAN et al, 2015). Observa-se que alguns estudiosos do assunto preferem chamar o equipamento de *phase differencing bathymetric sonar* (GOSTNEL; YOOS; BRODET, 2006) ou de *phase-measuring bathymetric sidescan* (JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Tais variações se devem à evolução da tecnologia de aquisição de dados. Inicialmente, a aquisição era feita somente a partir da interação dos ecos recebidos pelo equipamento, sem a medição de fase da onda. Com a inserção do monitoramento da fase no sinal de retorno, alguns estudiosos preferiram usar outros termos para denominar o equipamento e deixaram o termo *interferometric sidescan* para designar os equipamentos que ainda utilizavam o método antigo. Contudo, como ver-se-á adiante, ambos os métodos estão lastrados na interferometria, sendo o termo *interferometric sidescan* utilizado, como mostram as atuais referências citadas nesta nota. Uma discussão mais interessante sobre a nomenclatura pode ser achada em CLARKE, 2013a.

Tendo todos esses sensores sido integrados e as informações correlacionadas (Figura 3), é possível realizar um levantamento hidrográfico com ênfase nas informações batimétricas, podendo-se considerar que foi conduzido um levantamento batimétrico em determinada região.

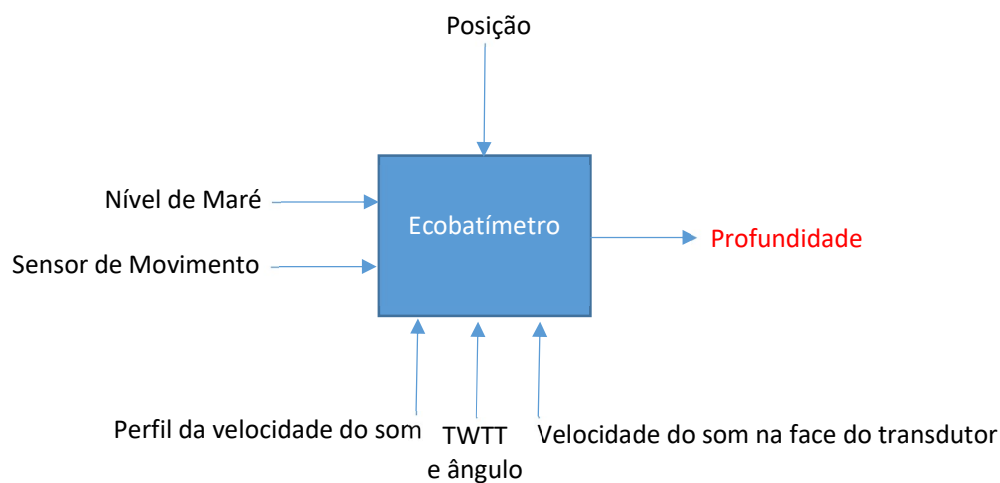


Figura 3 – Informações necessárias para um levantamento batimétrico.

É digno de nota que cada medição deve estar elencada com sua incerteza. É a partir dela que os órgãos competentes estabelecem parâmetros para que um levantamento batimétrico possa ser considerado de ordem Especial, 1a, 1b e 2 (DHN, 2017; OHI, 2008). Na Tabela 1, consta um resumo dos valores preconizados no que tange à incerteza vertical total:

Tabela 1 – Especificações para batimetria de um Levantamento Hidrográfico. Fonte: adaptado de (OHI, 2008).

Ordem	Especial	1a	1b	2
Descrição das áreas	Área onde a altura livre sobre a quilha é de importância crítica.	Áreas com profundidades menores que 100 m nas quais a lazeira abaixo da quilha não é de importância crítica, mas onde há possibilidades de existirem feições que ponham em risco a navegação.	Áreas com profundidades menores que 100 m nas quais a lazeira abaixo da quilha não é um fator de risco em virtude do tipo de embarcações que deverão transitar nelas.	Áreas com profundidades maiores que 100 m nas quais uma descrição geral do solo marítimo é considerada apropriada.
IVT⁷ máxima permitida (nível de confiança 95%)	a = 0,25 m b = 0,0075	a = 0,5 m b = 0,013	a = 0,5 m b = 0,013	a = 1,0 m b = 0,023
Levantamento Completo do Solo Marítimo	Requerido	Requerido	Não requerido	Não requerido
Deteção de feições	Feições cúbicas > 1 m	Feições cúbicas > 2 m, em profundidades até 40 m; 10% d acima de 40 m	Não aplicável	Não aplicável

Fonte: adaptado de OHI (2008).

Onde:

$$IVT = \pm \sqrt{a^2 + (bxd)^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

a = apresenta a parcela da incerteza que não varia de acordo com a profundidade;

b = é um coeficiente que apresenta a parcela da incerteza que varia de acordo com a profundidade;

d = profundidade; e

bxd = parcela da incerteza que varia de acordo com a profundidade.

Atualmente, a OHI e a DHN consideram que os levantamentos batimétricos, para que possam atingir os patamares mais rigorosos, devem providenciar cobertura total do fundo

⁷ Incerteza Vertical Total é a componente da incerteza total propagada que representa a imprecisão da medida batimétrica.

marinho. Cobertura total é um termo dúbio, pois em verdade, nunca se consegue ensonificar toda uma área (OHI, 2008). Para isso, está estabelecido que o levantamento completo do fundo marinho é aquele que consegue detectar feições iguais ou maiores a 1 metro cúbico de volume quando em Ordem Especial e 2 metros cúbicos quando em Ordem 1a até 40 metros de profundidade (DHN, 2017). Os únicos sensores batimétricos que são mundialmente reconhecidos como capazes de atingir tal marca são os ecobatímetros multifeixe e os sonares de varredura lateral interferométrico⁸ (DODD, 2013; LURTON; AUGUSTIN, 2010; OHI, 2005).

1.3 ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE E SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO

O ecobatímetro multifeixe (MBES – *multibeam echosounder*) é, em sua maioria, um sonar capaz de fornecer batimetria por meio de cruzamento entre as ondas acústicas geradas pelos sensores de transmissão e recepção, que estão dispostos ortogonalmente, em uma técnica conhecida por *mills cross* (Figura 4) (BJØRNØ, 2011; L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000; SIMMONS et al., 2017). Nos cruzamentos entre ambas as frentes de ondas, tem-se os feixes, por isso diz-se que este sensor utiliza a técnica do *beam forming* (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000) para fornecer a batimetria. A detecção do sinal que será usado para o cálculo da profundidade é feita por amplitude e por fase (OHI, 2005).

⁸ Em prol de evitar dúbia interpretação, este trabalho considera como sendo ecobatímetros multifeixe aqueles que tem o princípio de funcionamento do *beam forming* e como sendo sonares de varredura lateral interferométricos aqueles que tem como princípio de funcionamento a diferenciação de fase apenas. Tanto a Organização Hidrográfica Internacional quanto alguns autores da literatura, dos quais David Dodd é um exemplo, consideram ambos os equipamentos como sendo **sistemas multifeixe**.

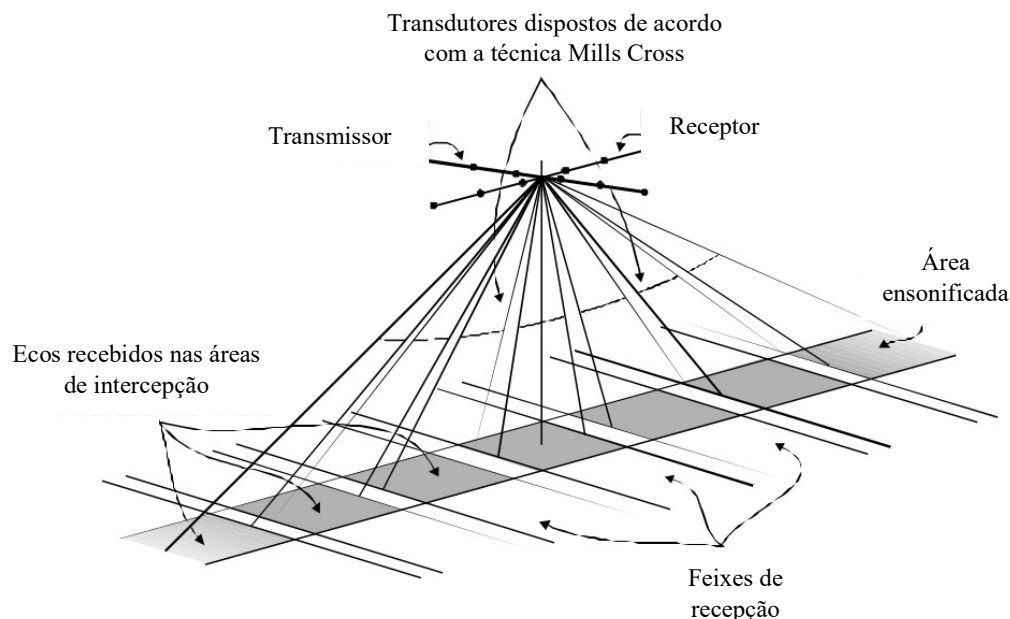


Figura 4 – Detecção do ecobatímetro multifeixe utilizando o princípio do beam forming e a técnica do mills cross. Fonte: adaptado de L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS (2000).

O sonar de varredura lateral (SVL ou SSS – *sidescan sonar*) interferométrico (PDBS – *phase differencing bathymetric sonar* ou PMBS – *phase-measuring bathymetric sidescan*) é um sensor capaz de fornecer imagem de retroespalhamento (*backscattering*) e informações batimétricas (Figura 5) (JERRAM; SCHMIDT, 2015a). Para tal, ele se compõe de um transmissor e mais de um receptor espaçados a uma distância conhecida, múltipla do comprimento de onda λ (KONGSBERG MARITIME, 2014; LURTON, 2000; WILBY, 1999) (o princípio de funcionamento do equipamento será analisado mais adiante). Através da diferenciação por fase decorrente da interferometria (OHI, 2005), o PDBS é capaz de fornecer informação de profundidade georreferenciada.

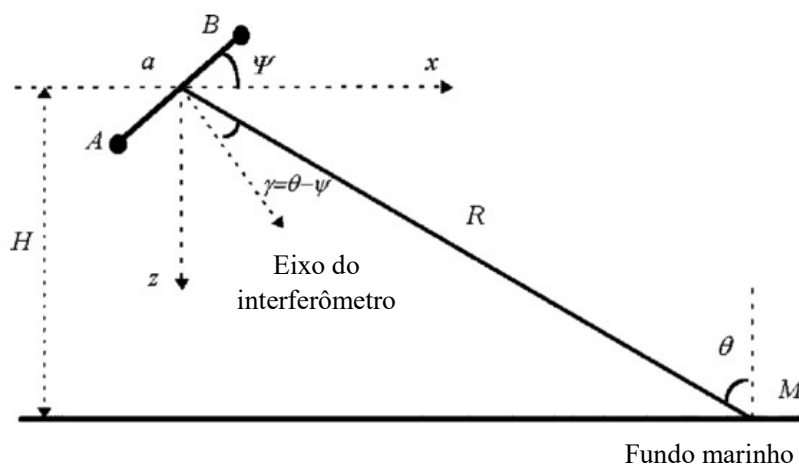


Figura 5 – Desenho esquemático do funcionamento de um sonar de varredura lateral interferométrico com 2 receptores (A e B) com uma distância entre ambos ($a = n \cdot \lambda$). Fonte: adaptado de LURTON (2000).

Em uma rápida comparação, o PDBS é tem menor custo (AI; PARENT, 2011); possui uma capacidade de varredura maior em águas rasas (BRISSON; WOLFE; STALEY, 2014; GOSTNELL, 2005; JERRAM; SCHMIDT, 2015b), proporcionando um levantamento mais rápido e com maior capacidade de visualização nas bordas da varredura (BRISSON; WOLFE; STALEY, 2014); maior densidade de dados⁹ (USACE, 2013), levando a uma grande resolução em *acrosstrack* (1-10 mm) (JERRAM; SCHMIDT, 2015a; JERRAM; SCHMIDT, 2015b; MA; XU; XU, 2016); possui a mesma visualização *backscatter* do SSS (BRISSON; WOLFE; STALEY, 2014; JERRAM; SCHMIDT, 2015b); e tem por princípio de funcionamento a interferometria, que também é usada no MBES na detecção por fase.

Contudo, o SSS interferométrico ainda não está totalmente aceito pela comunidade internacional e nem pelo Brasil. Tal fato se deve a uma série de fatores como: pouca capacidade de detecção no nadir (DODD, 2013; MA; XU; XU, 2016); dados muito ruidosos (DODD, 2013; JERRAM; SCHMIDT, 2015b); ambiguidade de profundidade; grande volume de dados, o que requer melhor capacidade de computação (JERRAM; SCHMIDT, 2015b; MA; XU; XU, 2016); e incerteza vertical acentuada (BRISSON; WOLFE; STALEY, 2014; JERRAM; SCHMIDT, 2015b; NOAA, 2017). Todos os fatores positivos e negativos serão analisados ao longo do trabalho e será verificado se os mesmos causam uma grande variação no resultado, que são as informações batimétricas.

⁹ Em um MBES de 256 *beams*, em uma taxa de aquisição 40 Hz em águas rasas (até 200 m (DHN, 2017)), gera, em média 10.000 valores de profundidades por segundo. O PDBS, no mesmo ambiente, gera 50.000.

1.4 OBJETIVO DA PESQUISA

Mediante a controvérsia existente no que tange ao PDBS, este trabalho objetiva comparar a performance final de um levantamento batimétrico realizado por este sistema em relação a performance de um levantamento batimétrico executado por um MBES, considerado padrão e aceito pela DHN¹⁰. Para atingir tal objetivo, esta pesquisa trabalhou com as seguintes hipóteses:

- i. O PDBS, montado em uma embarcação por meio de uma haste, é capaz de fornecer informações batimétricas cujas incertezas verticais estejam dentro das preconizadas pela OHI (e seguidas pela DHN); e
- ii. O PDBS, montado em uma embarcação por meio de uma haste, é capaz de fornecer uma superfície batimétrica que seja compatível com a superfície batimétrica da mesma área gerada por um MBES.

Assim, a primeira hipótese versará sobre as incertezas do PDBS, verificando se o mesmo atende aos requisitos estipulados pela OHI (Tabela 1). Este seria o primeiro obstáculo para que o SSS interferométrico possa ser usado para fins de segurança da navegação, pois iria de encontro ao critério de IVT máxima permitida.

Contudo, ainda mediante a Tabela 1, outro critério a ser observado é a capacidade de detecção de feições. Tal particularidade é difícil de avaliar, uma vez que é impossível fazer uma medição direta da topografia do fundo marinho e de alvos existentes, sejam eles feitos pelo homem ou não. Para contornar esta dificuldade, será utilizado uma superfície batimétrica criada a partir de um ecobatímetro multifeixe, que é atualmente o sensor mais utilizado pelos Serviços Hidrográficos para segurança da navegação. Através da comparação das superfícies geradas, será possível verificar se o PDBS é capaz de detectar feições dos mais diversos tamanhos e se é capaz de definir suas dimensões acuradamente.

1.5 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O Serviço Hidrográfico Brasileiro, cargo atualmente exercido pela DHN, não aceita levantamentos realizados com o PDBS para fins de atualização da carta náutica e para a

¹⁰ A DHN, representada pelo Centro de Hidrografia da Marinha, tem todo um procedimento já compilado de processamento de LH. Para maior esclarecimento, ver MAIA; FLORENTINO; PIMENTEL, 2018.

segurança da navegação. Esta postura se deve à falta de testes realizados com o rigor hidrográfico em um ambiente controlado dentro de águas brasileiras, em que os resultados fornecidos possam ser confrontados com dados amplamente reconhecidos. Ou seja, existe, por parte da DHN, uma dúvida quanto à eficácia de sua aplicação e não a negação de uma tecnologia em si, por falta de informações que atestem que o SSS interferométrico é capaz de prover dados tão confiáveis quanto os fornecidos pelo MBES.

Assim, esse trabalho objetiva como resultado fornecer respostas que possam servir de subsídios para um posicionamento da DHN quanto ao uso do PDBS, seja ele favorável, desfavorável ou favorável com algumas restrições.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação terá a seguinte estrutura: o presente capítulo é referente à uma introdução ao levantamento hidrográfico e sua importância, bem como os meios de fazê-lo e os parâmetros a serem seguidos. O capítulo 2 fará uma revisão bibliográfica do que já foi estudado sobre o assunto, focando-se em discutir o princípio de funcionamento do MBES e do PDBS, de forma a servir de subsídio para uma comparação mais embasada. O capítulo 3 versará sobre a metodologia desenvolvida para a comparação entre um MBES e um PDBS. O capítulo 4 se manterá nos resultados e discussões de várias sondagens realizadas com ambos equipamentos supracitados. No capítulo 5, pretende-se fazer uma conclusão sobre o tema e no capítulo 6, constarão as referências bibliográficas utilizadas ou consultadas para a confecção desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O QUE É INTERFEROMETRIA

O entendimento do termo “interferometria” é essencial para a compreensão do presente trabalho. É difícil encontrar uma definição que faça alusão ao seu funcionamento na batimetria e, muitas vezes, interferometria é tida como um tipo de detecção, enquanto na verdade, é o nome dado à técnica que pode ser utilizada por diversos tipos de detecção. Assim, faz-se mister entendê-la.

Como exemplo, segundo o Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa Michaelis (2017), interferometria é “conjunto de processos de medida de comprimento e de índice de refração, ou de análise de superfícies ópticas, baseado na interferência da luz”. A *Enciclopedia della Scienza e della Tecnica* (2008) estabelece o vocábulo como sendo “[...] o estudo do fenômeno de interferência de luz e suas aplicações para fins científicos [...]” (tradução livre). Contudo estas definições são muito vagas para um entendimento maior da técnica em si e limitam seu uso apenas ao espectro magnético.

Já o *English Oxford Living Dictionary* (2017) vai definir interferometria através da definição de interferômetros, que seria “um instrumento no qual a interferência de dois feixes é empregada para fazer medições precisas” (tradução livre), onde foca na utilidade da técnica, mas não explica nem a natureza do feixe (eletromagnético ou sonoro) nem a que tipos de medições podem ser empregadas.

O *Collins Dictionary* (2017) vai parametrizar o termo interferômetro, como sendo “qualquer instrumento de onda acústica, ótica ou microonda que utiliza padrões de interferência ou ondas para realizar medidas acuradas do comprimento da onda, velocidade da onda, distância, etc” (tradução livre). O *Dictionary of Earth Sciences* utiliza também o termo interferômetro como sendo “um instrumento usado em sensoriamento remoto que forma e usa padrões de interferência em radiação, para medir seu comprimento de onda” (tradução livre) (ALLABY, 2008). A *UXL Encyclopedia of Science* vai definir interferometria como sendo

“o processo de realizar medidas, permitindo que som, luz ou outros tipos de ondas interfiram entre si. Tem vários usos, como o estudo da velocidade do som em um fluido, localização e posição de objetos no espaço, determinação de tamanho e propriedades de objetos sem tocá-los ou perturbá-los [...]” (tradução livre) (UXL Enciclopedia of Science, 2002).

Estas definições já são mais completas, mostrando os tipos de onda que podem ser usados e qual a finalidade do uso e o propósito das medidas.

A partir destas definições, pode-se compreender que interferometria é a técnica de combinar duas ou mais ondas de mesma natureza, sejam elas acústicas ou eletromagnéticas, para obter medidas precisas. Na batimetria ela é usada para detecção de atrasos em fase dentro de um comprimento de onda acústico, usando um processo de sub-amostragem (GARELLO *et al.*, 2008).

Para melhor compreensão deste trabalho, pode-se definir interferometria como sendo a técnica na qual duas ondas acústicas interagem em prol de se mensurar a defasagem entre elas e, após operações matemáticas, converter essa medida em diferença de ângulo ou tempo.

2.2 INTERFEROMETRIA NA BATIMETRIA

A diferença de fase é amplamente utilizada para a estimativa de profundidades (JIN; TANG, 1996). A interferometria, para a batimetria, se dedica à medição do ângulo do eco de retorno, por meio da diferença de fase que a mesma frente de onda atinge dois ou mais receptores de um mesmo *array* em um transdutor (DENBIGH, 1989) (Figura 6). Cada elemento do *array* receberá a frente de onda em instantes diferentes, fazendo com que cada um registre a onda em momentos sequenciais, parecendo ondas diferentes (na verdade, elas estarão em fases diferentes). A partir da diferença de fase (Eq. 2), pode-se calcular ângulo γ com que uma determinada frente de onda chegou em um *array* (Figura 7) (LURTON, 2000).

$$\Delta\varphi_{AB} = 2\pi \frac{a}{\lambda} \text{sen}\gamma \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde $\Delta\varphi_{AB}$ é a diferença de fase entre os receptores A e B;

a é distância de separação entre dois elementos distintos de recepção dentro de um *array*;

λ é o comprimento de onda do sinal; e

γ é ângulo entre o eixo do interferômetro (direção ortogonal ao alinhamento dos elementos) e a direção do raio.

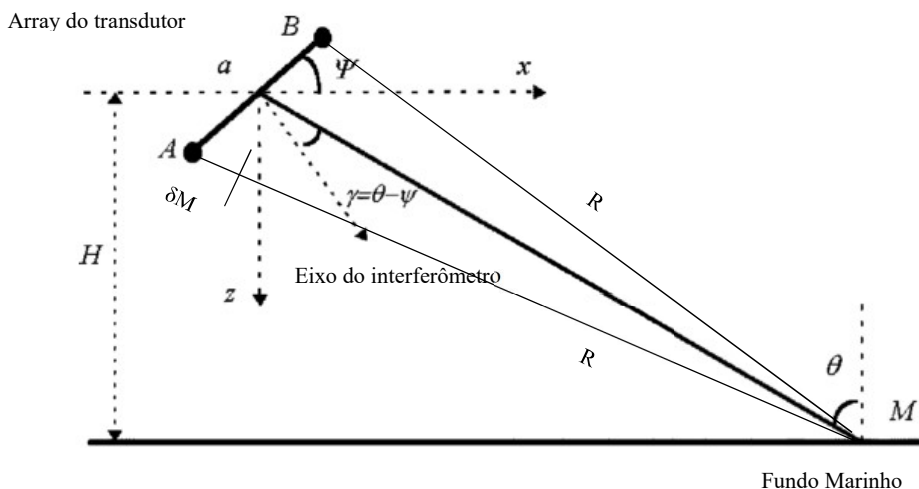


Figura 6 – Desenho esquemático de dois elementos de um mesmo array recebendo a informação da mesma feição em instantes diferentes. O caminho da feição M até o receptor B tem comprimento R , enquanto que o caminho da feição M até o receptor A tem comprimento $R + \delta M$, fazendo com que o eco de resposta chegue em momentos diferentes em cada elemento. Fonte: adaptado de LURTON (2000).

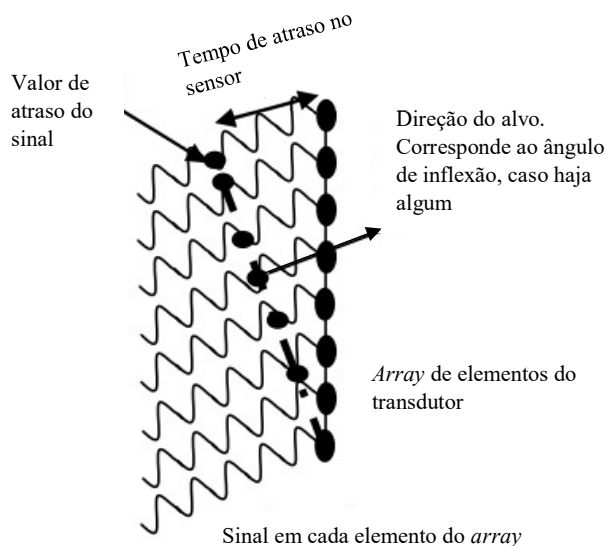


Figura 7 - Chegada da frente de onda ao transdutor. Como a frente de onda chega em momentos distintos, cada elemento do array irá gerar uma onda diferente que será usada na comparação. A inclinação do sinal recebido será dada pelo alinhamento, em fase, do sinal em cada sensor. Fonte: adaptado de GARELLO et al. (2008).

Dessa forma, pode-se comparar várias formas de ondas supostamente iguais¹¹ e a partir de tal procedimento, extrair a informação que se deseja. Nesta comparação, apenas dois elementos são necessários. Para que o cálculo seja realizado, os elementos devem estar

¹¹ As ondas seriam iguais pois foram gerados pelo mesmo eco de retorno, porém alguns fatores levam a algumas dissimilaridades que serão vistas no próximo item.

espaçados de uma distância conhecida (em função do comprimento de onda λ). Eles estarão alinhados em uma direção, apontando o espaçamento para uma direção ortogonal, que é o eixo do interferômetro. A partir da diferenciação da fase, quando esta for zero (*zero crossing*), consegue-se estabelecer a direção da frente de onda (Figura 8). A partir do momento do estabelecimento desse ponto, pode-se calcular o par ângulo-tempo para qualquer ponto da curva.

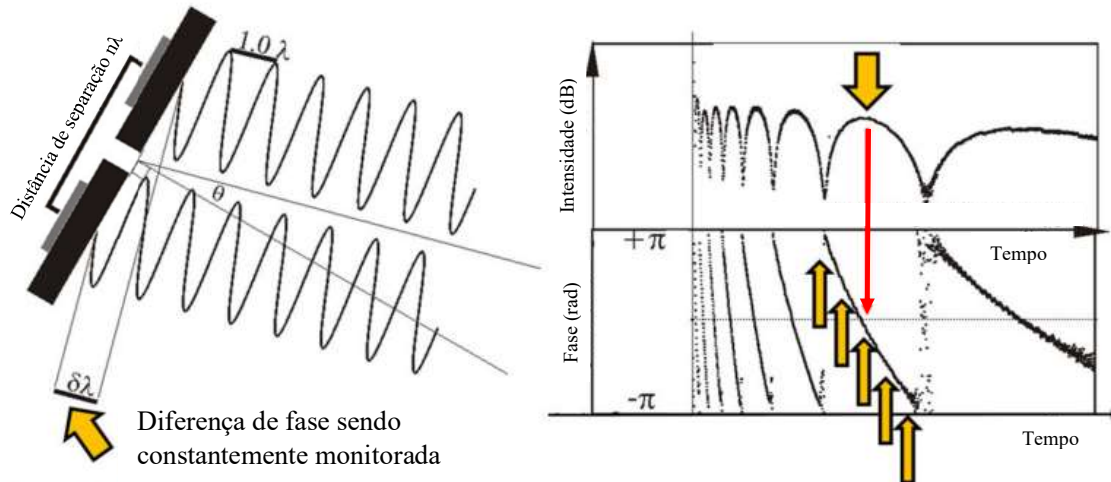


Figura 8 – À esquerda, tem-se dois elementos de um array separados por uma distância proporcional ao comprimento de onda λ . À direita em cima, tem-se a intensidade do sinal que chega em função do tempo e em baixo tem-se a fase. Nota-se que dentro da janela estudada, é possível obter mais de uma informação de zero crossing. Isso é o que dá origem às ambiguidades, pois cada instante desse é um ângulo diferente calculado.

Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

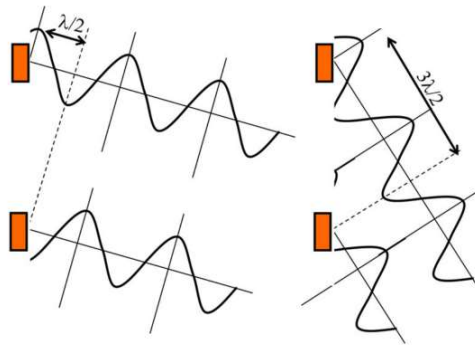


Figura 9 – O mesmo array pode receber duas frentes de ondas com inclinações diferentes, porém o resultado da diferença de fase será o mesmo, ocasionando ambiguidades. Aqui, mostra-se como duas ondas de ângulos diferentes teriam o mesmo zero crossing. A cada $\lambda/2$ somado, existiria uma ambiguidade. Fonte: CLARKE (2013a).

O problema é que dependendo do espaçamento entre os receptores, pode haver mais de uma informação de ângulo, ocasionando ambiguidades (Figura 9). Para que não ocorram, os elementos do *array* devem estar espaçados de uma distância de $\lambda/2$. Contudo, nesta configuração, a resolução angular decai, fazendo com que seja difícil estabelecer o instante de cada valor da diferença de fase (vai depender da relação sinal-ruído – Figura 11). Para contornar tal dificuldade, pode-se utilizar uma distância maior, porém a cada vez que se soma mais meio comprimento de onda, acresce-se mais uma informação de ambiguidade, pois se contempla mais um ciclo da onda (Figura 9) (WILBY, 1999). Enquanto que dois *arrays* distantes de $\lambda/2$ fornecem apenas uma informação de ângulo a uma resolução ruim, dois que estão distantes 5λ têm uma boa resolução, porém 11 informações de diferença de fase e, portanto, 11 ângulos diferentes (Figura 10). O que ocorre atualmente é que o MBES e o PDBS usam espaçamentos maiores que apenas $\lambda/2$ e diferentes métodos de resolução de ambiguidades.

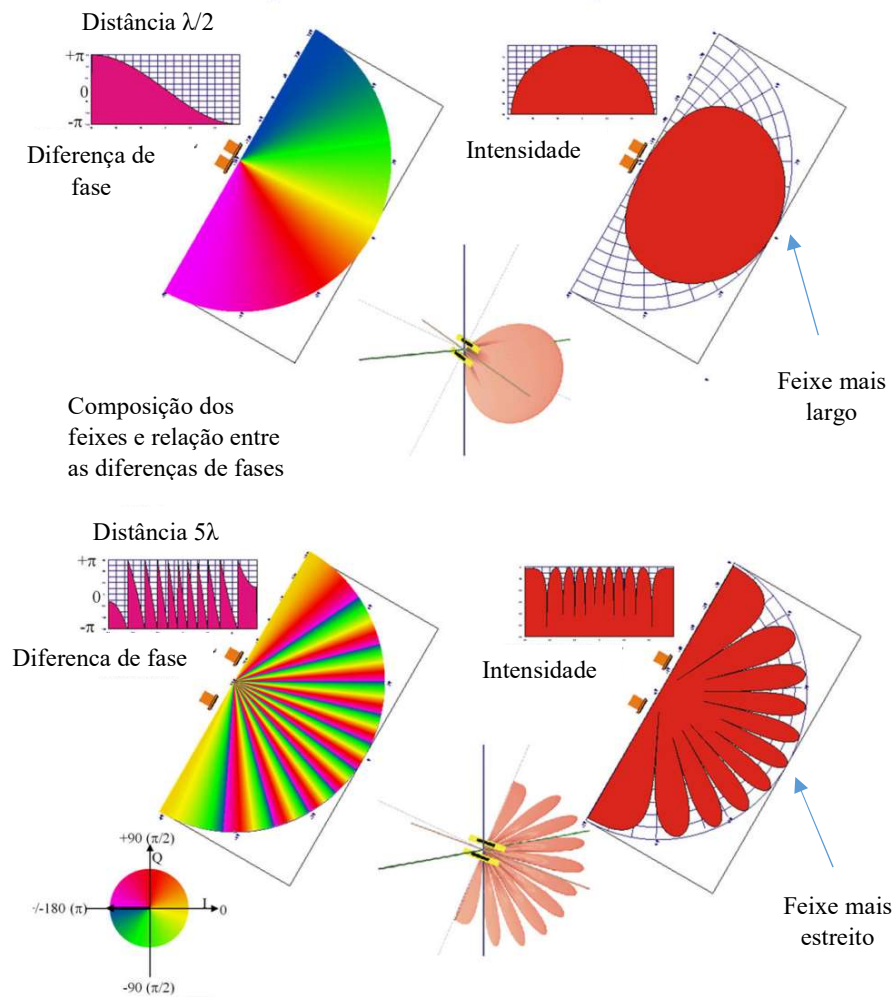


Figura 10 – Na parte de cima da figura tem-se um array com elementos afastados $\lambda/2$. Nesta configuração, apenas um ângulo é detectado, porém o feixe é muito largo, o que diminui seu poder discriminador em ângulo. Já a parte de baixo apresenta um array com elementos distanciados de 5λ . Nesta configuração, tem-se 11 ângulos possíveis (cada feixe é uma solução), contudo observa-se que os feixes são bem mais finos, o que aumenta a resolução angular. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

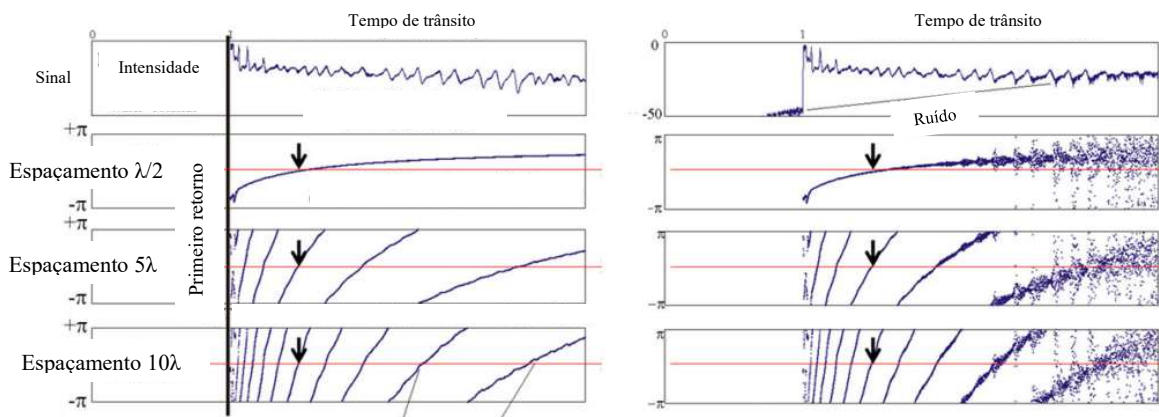


Figura 11 – Exemplo de diferentes arrays com elementos espaçados entre $\lambda/2$, 5λ e 10λ (de cima para baixo). A figura da esquerda não apresenta ruído. A da direita tem uma relação sinal-ruído de 30 dB. Uma incerteza na determinação do zero crossing (seta preta) em um array com espaçamento $\lambda/2$ gera uma variação consideravelmente maior no cálculo do tempo do que uma incerteza em um array com espaçamento 10λ . Quanto maior o espaçamento entre os elementos do array, mais vertical é a curva, fazendo com que a mesma não sofra tanto a ação de incertezas como as ocasionadas pelo ruído. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

Através desse procedimento é possível se estabelecer o par ângulo-tempo para cada eco de retorno que chega em um *array*. A interferometria é utilizada por ambos os sensores a serem abordados neste trabalho: o MBES e o PDBS. Entretanto, ela é usada para fins diferentes em cada um. No MBES, se destina ao cálculo do instante exato de recepção do eco de retorno para se obter o TWTT. Já no PDBS, objetiva o cálculo do ângulo de chegada do eco de retorno (JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Para melhor compreensão de como a interferometria é utilizada em cada equipamento, faz-se mister entender como ocorre a recepção e o cálculo da batimetria em cada um.

2.3 DETECÇÃO NO ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE

Como já falado no item 1.3, o ecobatímetro multifeixe é formado por dois transdutores, um emissor e um receptor. Estes podem estar disposto a forma de um arco (*barrel*) ou uma forma plana¹² (CARTWRIGHT, 2003), que será a forma tratada neste trabalho. Neste sensor, será utilizada a técnica de formação de feixes *mills cross*, na qual o cruzamento da frente de onda do transmissor com o setor coberto pelos elementos do transmissor forma os feixes.

¹² A forma do transdutor interferirá na geometria dos feixes e na sua projeção no fundo marinho. Ambas apresentam algumas vantagens e desvantagens em relação à outra, contudo sem alterar as técnicas de recepção e detecção de fundo.

O transdutor transmissor fica instalado paralelo ao comprimento do navio e produz uma frente de onda que é estreita no sentido longitudinal (deslocamento do navio – *alongtrack*) e larga no sentido transversal (*acrosstrack*). Já o receptor se dispõe no sentido transversal do navio e através da técnica do *steering*, consegue gerar determinados setores angulares que receberão o eco da onda sonora propagada pelo transmissor (CARTWRIGHT, 2003) (Figura 12). Assim, o receptor sabe de quais ângulos estão vindo os ecos que serão processados e gerarão a informação de profundidade.

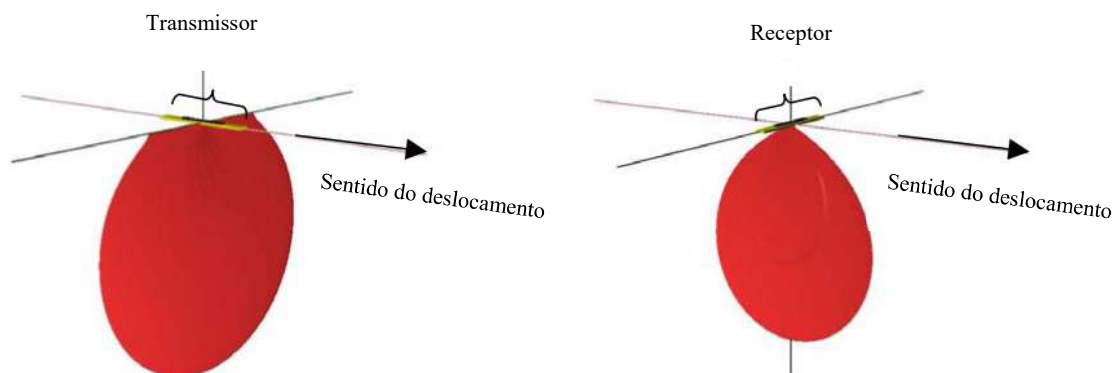


Figura 12 – Disposição dos feixes de transmissão e recepção durante a técnica do mills cross. Na esquerda tem-se o transmissor, cujo feixe é estreito *alongtrack* e largo *acrosstrack*. Na direita tem-se o receptor, cujo feixe é estreito *alongtrack* e largo *acrosstrack*. Fonte: adaptado de CARTWRIGHT (2003).

Como dito no item 1.3, para se chegar na informação da profundidade, faz-se necessário o conhecimento do TWTT (também chamado de TOA – *Time Of Arrival*) e do ângulo de chegada do sinal (DOA – *Direction Of Arrival*) (PEREIRA, 2015). Estas duas variáveis podem ser expressas, por ocasião da recepção do sinal, em duas formas: o Diagrama de Torta (*Pie Diagram*) e o Diagrama Tempo-Ângulo (*Time-Angle Diagram*). O primeiro é uma forma polar de mostrar as duas grandezas físicas, tendo como origem dos ângulos o transdutor, o eixo x como sendo o ângulo e o eixo y tempo. O segundo método é um gráfico cartesiano, sendo o eixo do x o tempo e o eixo y o ângulo (PEREIRA, 2015). Através desses gráficos é possível verificar que, a partir de uma variável, pode-se obter a outra. Ou seja, a partir de determinado TOA, obtém-se um DOA e a recíproca também é verdadeira (Figura 13).

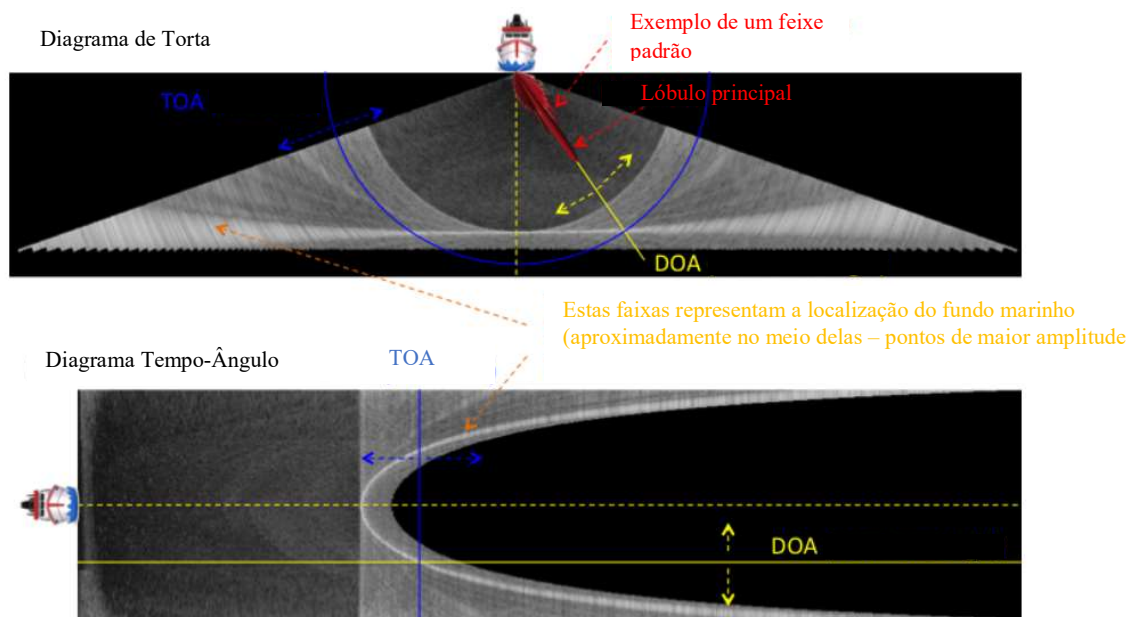


Figura 13 – Diagrama de Torta e Tempo-Ângulo. A partir dessas figuras é possível se vislumbrar como a partir do DOA pode-se inferir o valor do TOA e vice-versa. Importante notar que a detecção o fundo marinho é representado por faixas e não por linhas de valores únicos. Tal fato mostra que existe uma incerteza nos cálculos de uma grandeza a partir da outra. Fonte: adaptado de PEREIRA (2015).

Contudo, existe uma incerteza na definição dos valores exatos do par, sendo que a escolha de um valor de ângulo pode representar mais de um valor no campo do tempo e vice-versa. Dessa forma, a escolha das informações que venham a gerar a profundidade não é tão simples. A fim de resolver a questão, foram desenvolvidas técnicas, sendo as mais amplamente utilizadas a detecção em amplitude e em fase. Este trabalho abordará quatro técnicas: WMT (*Weighted Mean Time*), BDI (*Bearing Direction Indicator*), diferenciação por fase e HDBF (*High Definition Beam Forming*) (PEREIRA, 2015). Nelas, o princípio consiste, basicamente, na definição de um TOA a partir de um DOA (WMT, diferenciação por fase e HDBF) ou na definição de um DOA a partir de um TOA (BDI).

Para se ter uma boa compreensão das técnicas, suas vantagens e desvantagens, é necessário o entendimento do conceito de *footprint*. *Footprint* (ou pegada) é a projeção do feixe sobre o fundo marinho (JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Assim, quanto menor for o ângulo de incidência (ou maior o ângulo de ataque – *grazing angle*), profundidade e largura do feixe, menor será o *footprint*. O revés também ocorre, de forma que quanto menor o *grazing angle*, maior a profundidade e a largura do feixe, maior será o *footprint*. Quanto menor este for, menor porção do solo ele representará, o que aumenta o poder discriminador, gerando uma melhor

resolução (Figura 14). Ao contrário, quanto maior ele for, menor o poder discriminador (PEREIRA, 2015; USACE, 2013). Pode-se vislumbrar um exemplo do EM3000S no qual o *footprint* nadiral (logo abaixo do receptor, no seu nadir, resultando em um alto *grazing angle*) seja relativo a um feixe com largura $0,9^\circ$ e com *footprint* de 1,6% da profundidade, enquanto que um feixe lateral terá uma largura de $1,8^{o13}$ e um *footprint* de 20% da profundidade (CLARKE, 2012).

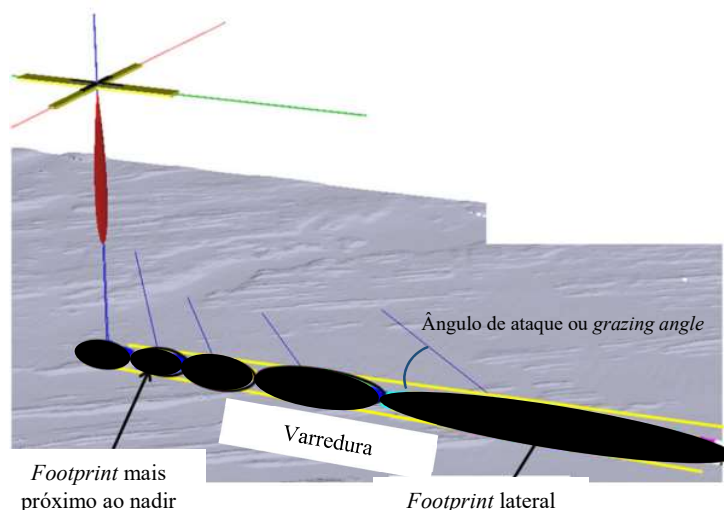


Figura 14 – As elipses pretas representam o footprint. Quanto mais centrais os footprints, menores eles são.
Fonte: adaptado de CLARKE (2013b).

2.3.1 WMT

A técnica WMT é a conhecida como detecção por amplitude. Ela vai utilizar a amplitude do sinal no tempo em cada canal para a determinação do TOA, considerando como DOA o centro do feixe direcionado. Cada canal é formado por um conjunto de elementos que compõem o receptor que podem variar nos diferentes modelos de multifeixe existentes, e representa um determinado ângulo. A informação do ângulo de chegada já é uma informação pré-determinada, restando saber o momento exato em que o sinal chega naquele ângulo (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000; PEREIRA, 2015;).

Nesta técnica, detecta-se o pico do feixe como sendo o ponto onde houve a maior interação entre o solo e o feixe. Intuitivamente, ele representaria o TOA. Porém como o *footprint* representa uma porção do fundo, há de se considerar que o pico pode não ser representativo do momento de intercepção do feixe com o solo e sim de alguma mudança na

¹³ A largura do feixe aumentará nos transdutores planos conforme estes forem cada vez mais laterais. Isto ocorre pela própria geometria do feixe, por ocasião da sua inclinação.

natureza do fundo. O pico do sinal pode não ser a representação da profundidade, e sim a constatação de fundos marinhos de natureza diferentes dentro de um mesmo *footprint*. Em prol de minimizar tais possibilidades, o que é considerado, mais normalmente, é o centro de massa do sinal (Figura 15). O instante em que se atinge seu centro de massa será considerado como o TOA (PEREIRA, 2015).

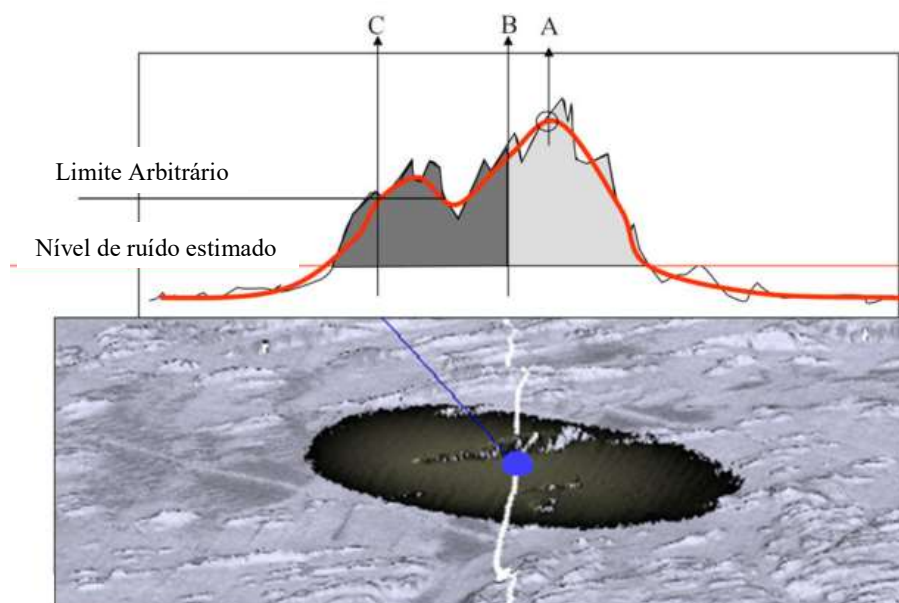


Figura 15 – Eco de retorno sendo processado por WMT. Em cima se tem a amplitude do sinal de retorno variando de acordo com o tempo. O ponto A é o pico do sinal já amaciado por uma média móvel. O ponto B é o centro de massa do sinal. O ponto C é o limite do sinal a partir do qual ele tenha uma amplitude que será considerada para o processamento. Fonte: adaptado de CLARKE (2013b).

A desvantagem dessa técnica é que quanto maior for o *footprint*, menos concentrado e pronunciado será o sinal. Logo é difícil encontrar o ponto do centro de massa, haja vista que qualquer variação pode alterar sua posição (e consequentemente o TOA) significativamente (PEREIRA, 2015).

Assim, o WMT é muito utilizado nos feixes nadirais ou centrais, onde seus respectivos *footprints* são pequenos (OHI, 2005).

2.3.2 BDI

Esta técnica também utiliza a amplitude do sinal, mas de outra forma. Aqui, o DOA será calculado a partir do TOA (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000;

PEREIRA, 2015). O eco de recepção dentro dos canais passará por uma FFT (*Fast Fourier Transform*) de modo que cada sinal possa ser separado em amplitudes e frequências. A frequência será o ângulo do qual provém o sinal. Este terá pelo menos uma frequência bem definida (Figura 16) (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000).

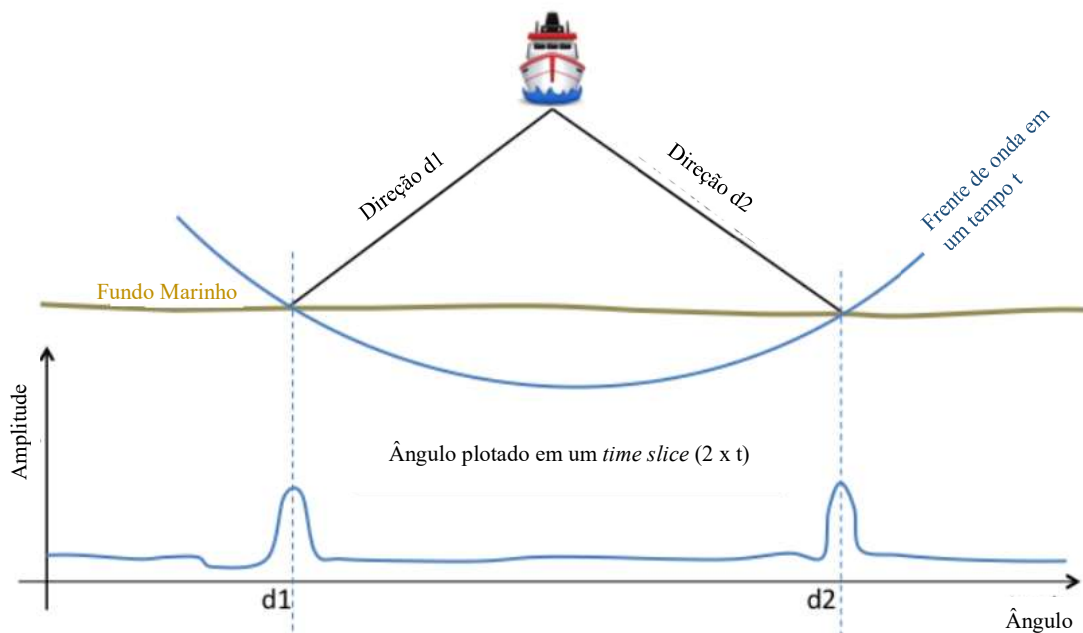


Figura 16 – Detecção por BDI. Quando a frente de onda atinge o solo, gera um eco que será recebido. Esse eco, em um determinado *time slice* ($2 \times t$) pode ser decomposto, através de uma FFT, em uma relação de amplitudes e ângulos. Assim, como o tempo já é conhecido, tem-se um ou mais ângulos a serem computados. Fonte: adaptado de PEREIRA (2015).

No caso de haver mais de uma detecção por canal, pode-se considerar duas possibilidades. A primeira ocorre devido ao sinal receber um eco dos feixes de BB e BE. Esta possibilidade se faz mais presente nos feixes centrais, entretanto, como ver-se-á mais adiante, esta técnica é utilizada pelos feixes laterais. Contudo, caso ainda haja essa detecção, ela pode ser facilmente descartada, uma vez que o seu sinal terá uma intensidade menor do que o seu correlato correspondente ao ângulo correto. Outra possibilidade é a detecção do eco de retorno de outros pontos próximos, que por sua vez virão de outra direção. Tal fato gerará um espectro de frequência com vários sinais, contudo, de forma análoga ao caso anterior, o eco correspondente ao ângulo daquele feixe terá a maior amplitude (PEREIRA, 2015). Nada impede de outros canais também detectarem o mesmo eco de retorno. Contudo este sinal terá uma amplitude menor dentro deste canal, devido a não ser proveniente do lóbulo principal (Figura 17). Tal fato também é levado em conta no processamento (desde que os ecos de retorno tenham

uma amplitude mínima para serem considerados), e a combinação de resultados de todos os canais acabam por fornecer a direção correta de cada ponto difrator (origem do retroespalhamento) (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000).

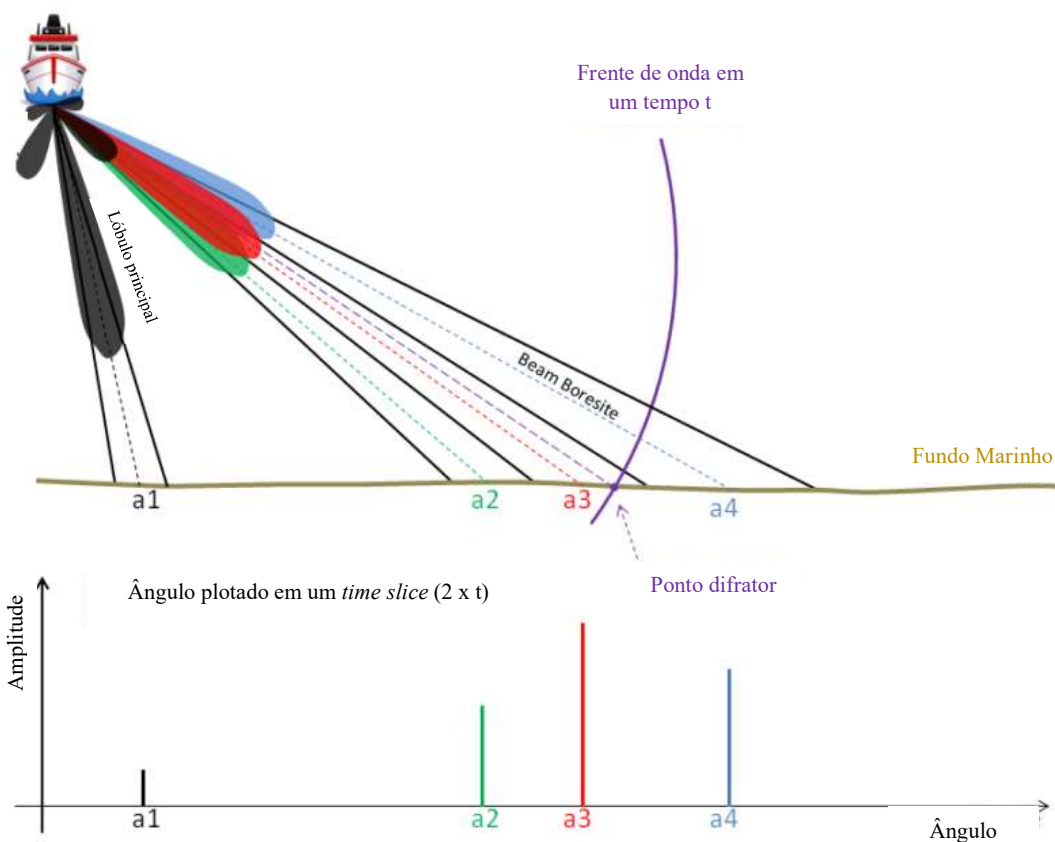


Figura 17 – Detecção de um ponto difrator por mais de um canal. Este ponto difrator terá seu retroespalhamento em diversos canais, contudo, a amplitude do eco será mais fraca nos outros canais senão no correto, pois estarão fora de seus lóbulos principais. Fonte: adaptado de PEREIRA (2015).

A desvantagem do BDI é sua incerteza. Quanto menos concentrado for o sinal (quanto maior o *footprint*) melhor é a discriminação de frequências e, portanto, a determinação do ângulo de chegada. Isto faz com que esta técnica seja muito utilizada nos feixes laterais ao invés dos feixes centrais. Contudo, nos feixes laterais, cada *footprint* corresponderá a um DOA de forma que não é possível estimar em qual ângulo exato e em que momento dentro do *footprint* houve a interação do sinal com o solo (PEREIRA, 2015). Isso produz uma incerteza da profundidade, que faz com que esta técnica fosse pouco utilizada (PEREIRA, 2015).

2.3.3 Diferenciação de fase

Esta técnica é conhecida como detecção por fase. Nela, o TOA será encontrado a partir do DOA. Cada canal, após direcionado no ângulo estabelecido, terá seus elementos subdivididos em dois receptores diferentes, espaçados por um múltiplo de comprimento de onda do sinal (Figura 18). Através da interferometria, pode-se comparar as fases dos ecos de retorno. No instante onde a diferença de fase é 0 (*zero crossing*), será o instante em que o canal recebeu o sinal referente ao ângulo em que ele estava direcionado. Este será o momento exato da detecção (Figura 19) (PEREIRA, 2015).

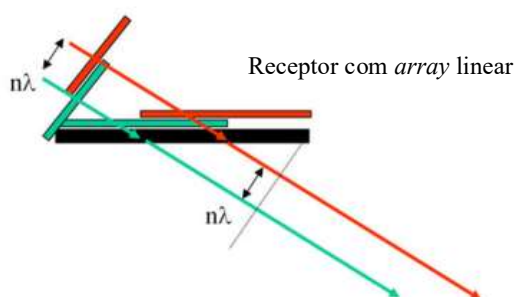


Figura 18 – Canal de um receptor de array linear para detecção em fase. Fonte: adaptado de CLARKE (2013b).

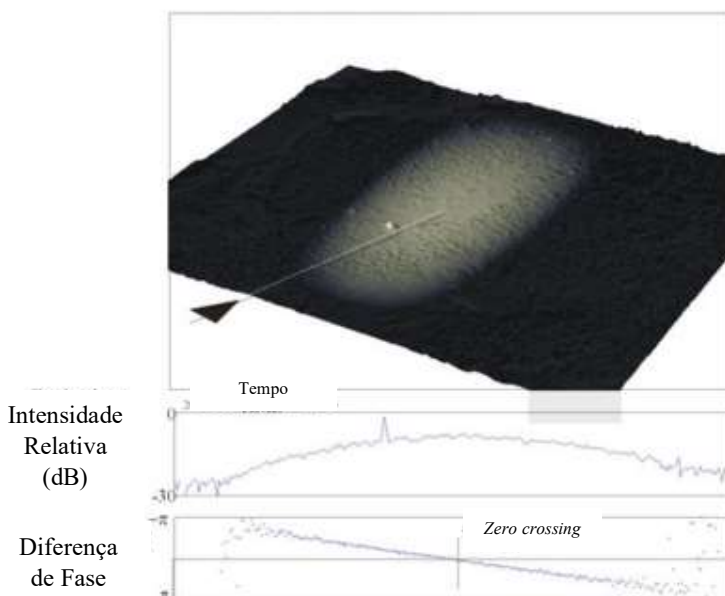


Figura 19 – Detecção por fase. Na figura mais acima tem-se o footprint em um grazing angle pequeno. Na figura do meio tem-se como é sua amplitude no tempo. A figura de baixo mostra a diferenciação de fase no tempo. O instante do zero crossing é o instante da detecção (TOA). Fonte: adaptado de CLARKE (2013b).

Aqui, como explicado anteriormente, também ocorrem ambiguidades, entretanto, elas são eliminadas a partir do momento que cada feixe já tem um ângulo pré-estabelecido. Contudo ainda existe a possibilidade de ocorrer a ambiguidade dentro do canal. Tal fato pode acontecer com objetos muito pequenos dentro de um *footprint* lateral (já que ele é maior quanto maior for a obliquidade), dificultando a detecção de alguns objetos (PEREIRA, 2015).

A desvantagem desta técnica é que quanto mais nadiral o sinal (maior o *grazing angle*), mais difícil é a diferenciação por fase. Tal fato faz com que esta técnica seja perfeita para os feixes laterais, desde que a SNR (*Signal-to-Noise Ratio* – relação sinal-ruído) seja alta. Ela também não tem o inconveniente da incerteza existente na BDI, pois é capaz de identificar o ponto de contato do feixe com o solo dentro do *footprint*, porém não é recomendada para os feixes centrais (PEREIRA, 2015).

2.3.4 *HDBF*

Esta é uma variação da diferenciação por fase. Nesta, da mesma forma que o WMT, BDI e a diferenciação por fase, cada feixe (canal) será representado por uma profundidade. Entretanto, sabe-se que os feixes laterais têm *footprint* maior e, independentemente do seu tamanho, só há uma profundidade representativa do mesmo.

Todavia, a partir da determinação do *zero crossing* pode-se determinar também o instante do cruzamento em $-\pi/4$, $\pi/4$, $-\pi/2$, $\pi/2$, $-3\pi/4$ e $3\pi/4$ (instantes mais utilizados). Neste procedimento, existirão mais pares ângulo-tempo, dando origem a mais profundidades dentro de um mesmo *footprint*, o que aumenta a resolução e o poder discriminador (Figura 20) (PEREIRA, 2015).

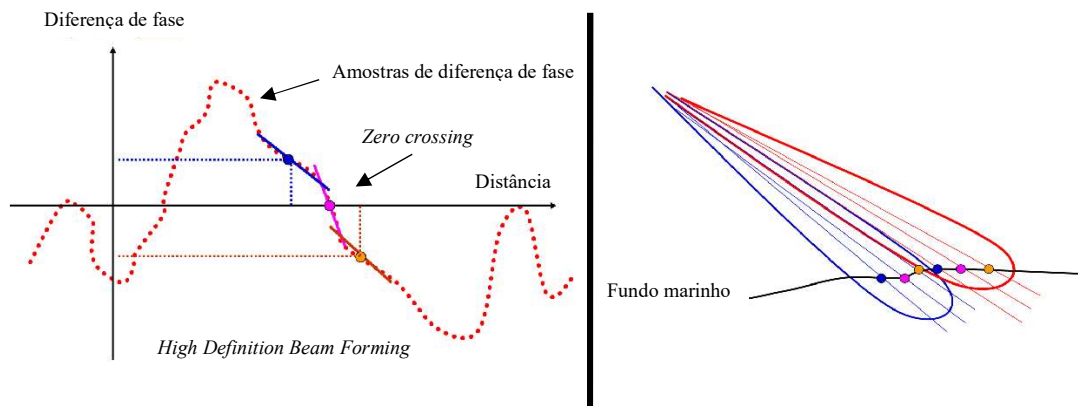


Figura 20 – HDBF. Na figura da esquerda tem-se como cada diferença de fase pode calcular mais de uma profundidade a partir do zero crossing. Na direita tem-se como cada feixe pode gerar mais de uma profundidade. Fonte: adaptado de KONGSBERG MARITIME (2014b).

2.3.5 Conclusão sobre os métodos

Atualmente, devido à incerteza no cálculo do DOA, o BDI quase não é mais utilizado pelos MBES. As técnicas utilizadas são o WMT para os feixes centrais, a diferenciação por fase e o HDBF para os feixes laterais (PEREIRA, 2015).

Essa divisão de técnica entre feixes centrais e laterais não é uma verdade absoluta. Todos os feixes passam pelas técnicas de WMT e diferenciação por fase, sendo verificado qual é a técnica que resultará em uma menor incerteza de profundidade dentro de cada feixe. Após essa verificação, é escolhido para detecção de profundidade a técnica que apresentou menor incerteza. A partir desse ponto, e desde que seja escolhida diferenciação por fase, a HDBF pode ser aplicada.

A alternância entre detecção de amplitude ou fase dentro de uma mesma varredura se deve à duração do eco de retorno: se for de curta duração, será utilizado o método de detecção por amplitude (WMT), se for de longa duração, fase (Detecção por fase e HDBF) (Figura 21) (KONGSBERG MARITIME, 2014b).

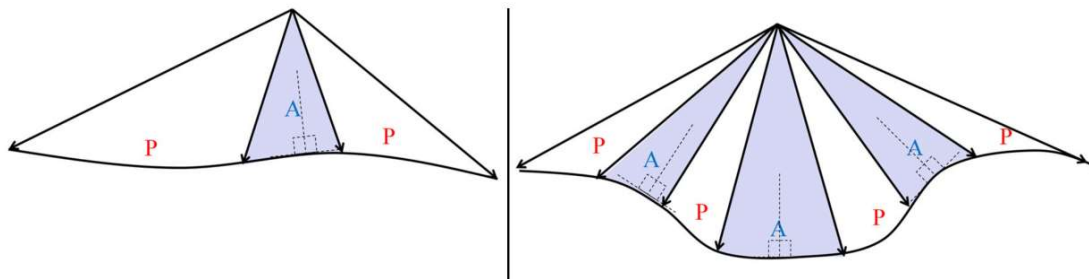


Figura 21 – Métodos de detecção diferente dentro de uma mesma superfície. Na esquerda, o fundo aproximadamente plano oferece um padrão de reflexão aproximadamente especular. Nesse caso, os feixes mais perpendiculares ao fundo marinho terão um eco de retorno de curta duração e conseqüentemente seu método de detecção de profundidades realizado por amplitude (representado no desenho em azul e pela letra A). O inverso ocorre com os feixes laterais, tendo sua detecção por fase (representado no desenho em branco e pela letra P). Na direita, o fundo não é plano, o que leva a ter feixes não centrais a terem uma incidência perpendicular ao fundo marinho. Logo eles serão detectados por amplitude, enquanto o restante será por fase. Fonte: CLARKE (2013a).

2.4 DETECÇÃO NO SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO

Ao contrário do MBES, o PDBS não possui diferentes métodos de detecção. Ele utiliza apenas a interferometria, ou seja, o método de detecção por fase, porém com algumas variações e adaptações.

Nele, a detecção é realizada apenas por diferença de fase (considerando o HDBF como uma variante desta). O PDBS possui um transmissor do sinal e mais de dois receptores, de modo a poder calcular a diferença de fase do sinal de retorno. Porém, ele não tem a técnica *steering*, ou de direcionamento de feixes. O *array* transmissor é comprido na direção do equipamento e estreito no sentido transversal (Figura 22), de modo a criar um feixe que seja curto *alongtrack* e longo *acrosstrack*. Tal fato permite que o PDBS ensonifique uma grande área transversal ao deslocamento do equipamento, porém uma pequena área no sentido do deslocamento (BLODEL, 2009; JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Até esse ponto, ele se assemelha ao multifeixe.



Figura 22 – Na esquerda, a disposição dos elementos em uma visão frontal. Nele pode-se ver o transmissor e os diversos pares de receptor espaçados em diferentes distâncias. Fonte: CLARKE (2013a). Na direita tem-se o equipamento montado em um AUV REMUS 100S da Empresa Kongsberg Maritime. Nele, o transdutor mais de ré é de um sidescan sem interferometria (dentro do círculo azul). O que está à frente (dentro de um círculo vermelho) é o Geoswath Plus, um sidescan sonar interferométrico. O array é disposto no sentido do deslocamento do equipamento. Fonte: adaptado de KONGSBERG MARITIME (2015).

Os seus receptores são dispostos paralelos ao transmissor. Isso permite que os mesmos tenham um feixe de recepção com a mesma geometria do feixe de transmissão. Dessa forma, fica impossível fazer o direcionamento dos feixes de recepção, pois o mesmo não está disposto *acrosstrack*, sendo inexequível ter pré-ciência do DOA. Na detecção do PDBS, a diferença de fase, ao revés da sua técnica correlata no MBES, é determinado o DOA (JERRAM; SCHMIDT, 2015b) por meio do TOA. Da mesma forma do multifeixe, cada par do interferômetro irá realizar a detecção por fase, contudo, estimando o DOA (LURTON, 2000).

Foi dito anteriormente que a ambiguidade advinda da interferometria era resolvida a partir da pré-ciência do DOA, no caso do multifeixe. Entretanto, o PDBS não pode contar com esse mesmo artifício. Esse problema é resolvido por meio de diversos pares de receptores espaçados a diferentes distâncias, mesmo sabendo que basta apenas um par de receptores para realizar a diferença de fase. Aqui será aplicada a técnica de Vernier. Nesta, cada par de receptores irá calcular vários ângulos (o correto e suas ambiguidades). A partir desse ponto, se verifica qual ângulo coincide entre os diversos pares. Ocorre que cada par terá apenas um ângulo que seja igual ao dos outros pares. Isso acontece porque os espaçamentos entre eles são diferentes, assim as ambiguidades não serão as mesmas (BLODEL, 2009; DENBIGH, 1989; LURTON, 2000; SCHMIDT; WEBER; LURTON, 2013). O ângulo que é o mesmo em todos os pares é tido como DOA (Figura 23). Dessa forma pode-se estabelecer o par Tempo-Ângulo, de forma a calcular a profundidade.

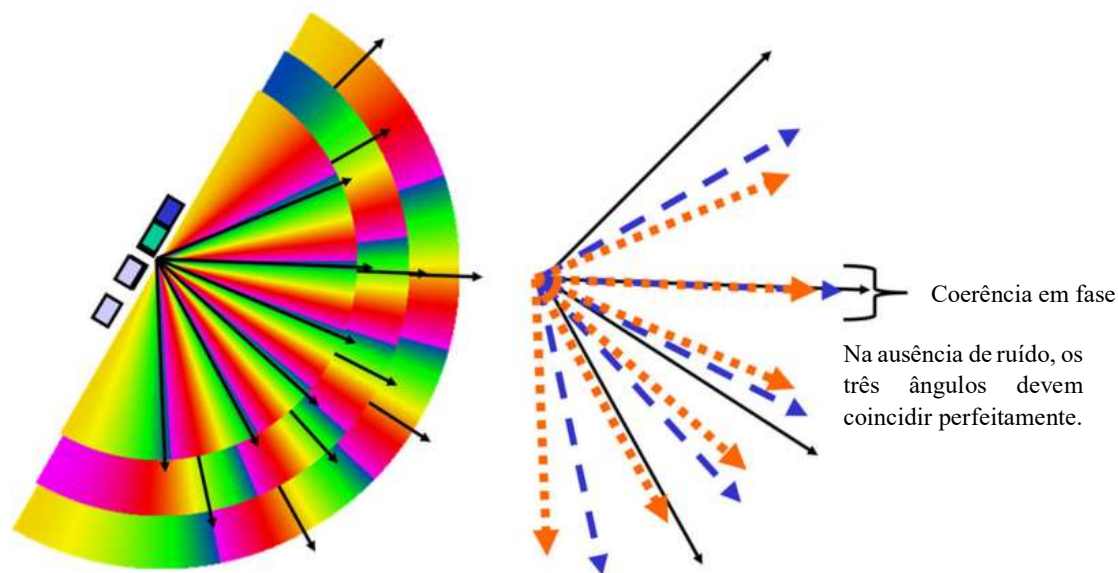


Figura 23 – Método Vernier. Cada par produzirá diversas leituras de ângulos. O valor que coincidir será o DOA. Na esquerda tem-se os arrays dispostos paralelamente e o sinal de retorno com suas ambiguidades. Na direita tem-se os ângulos possíveis. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

Tal artifício seria perfeito se não houvesse um ruído envolvido no sistema. O ângulo correto não apresenta exatamente o mesmo valor em todos os pares de receptores. Assim, na hora de fazer a incidência, deve haver uma tolerância, e o estabelecimento do DOA correto é uma média entre os valores de ângulo coincidentes ou cada ângulo gerado será um par DOA-TOA (JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Com isso, dependendo da SNR, pode haver incerteza na determinação da profundidade. Junta-se a isso outras fontes de erro, tais como: falta de correlação entre as linhas de base (*Baseline Decorrelation*), efeito da mudança de *footprint* (*Shifting Footprint Effect*), ambiguidade de mesma distância (*Common Slant Range Ambiguity* ou *Layover*) e espaço do nadir (*Nadir Gap*).

2.4.1 Ruído adicional

O ruído adicional que interfere no eco de retorno pode ter três causas: o sonar propriamente dito, a plataforma que conduz o sonar (navio, lancha, AUV, ROV, etc) e o ambiente marinho (LURTON, 2000). Isto causa uma interferência e influencia o eco de retorno, de modo a prejudicar sua detecção e o estabelecimento do par ângulo-tempo. Quanto maior a intensidade de ruído na água, menor será a relação sinal ruído (SNR) e maior a incerteza na detecção do sinal.

A Figura 11 (vista anteriormente) mostra como um sinal se deteriora com a adição de ruídos de 30 dB, 40 dB e 50 dB, fazendo com que o mesmo tenha uma incerteza mais alta conforme for diminuindo o *grazing angle*. Tal fato chega a impossibilitar a detecção em locais cuja a obliquidade venha a ser muito alta. A Figura 24 mostra como o ruído adicional afeta a SNR, a determinação de diferença de fase, do ângulo de chegada e da profundidade. Nesta simulação, a altura do sensor foi de 50 metros e a frequência de equipamento de 100 KHz. Foram adicionados 3 ruídos com intensidades diferentes de 30 dB, 40 dB e 50 dB. Em todos os quadros, o eixo x corresponde à distância nadiral. Quanto maior a distância, mais distante o eco de retorno estará do sensor, conseqüentemente maior será a obliquidade e menor o *grazing angle*. Como a altura do sensor foi de 50 m, a distância 0 m corresponde a uma obliquidade de ângulo 0°, 100 m representa aproximadamente 63°, 200 m representa aproximadamente 76° e 400 m representa aproximadamente 83°. No primeiro quadro (à esquerda em cima), o eixo y representa a SNR. No segundo quadro (à direita em cima), o eixo y representa a incerteza na detecção da diferença de fase. No terceiro quadro (à esquerda em baixo), o eixo y representa a incerteza na determinação do ângulo de chegada (ver Eq. 2). No quarto quadro (à direita em baixo), o eixo y representa a incerteza na determinação da profundidade.

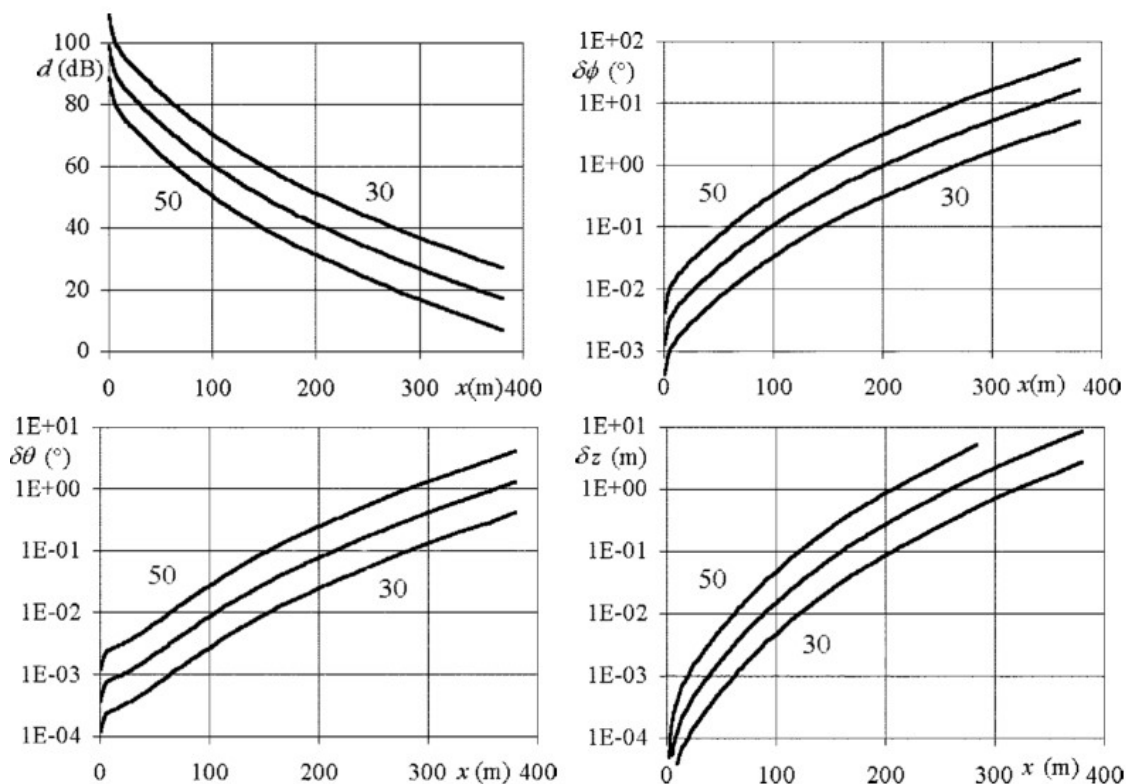


Figura 24 – A figura mostra o efeito do ruído adicional na detecção. Fonte: LURTON (2000).

2.4.2 Falta de correlação entre as linhas de base

Esse efeito é conhecido nos estudos de radar como *glint* (LURTON, 2000). No estudo de sonares é conhecido como *baseline decorrelation effect*. Nele, se considera que os *footprints* de cada recepção dentro do par não são exatamente iguais. Como cada *footprint* é formado pelo somatório de retroespalhamento dos pontos difratores e este somatório pode ser diferente em cada sensor (dado que o retroespalhamento é aleatório, o sinal de um ponto difrator que chega em um receptor não é necessariamente o mesmo sinal que chega no outro, fazendo com que interajam entre si, levando à uma composição diferente em cada receptor) (Figura 25). Isto leva a uma falta de coerência entre os sinais de saída de cada receptor (JIN; TANG, 1996), e consequentemente a flutuações na medida da diferença de fase e na medida do ângulo de chegada. Mesmo que a direção calculada seja a do centro do *footprint*, haverá uma pequena diferença entre dois pares distintos (LURTON, 2000).

Na Figura 26 tem-se um exemplo de incerteza da profundidade causada pela falta de correlação entre as linhas de base. Nesta simulação, foram considerados as mesmas condições da Figura 24, o eixo do interferômetro de 75° e o espaçamento entre os sensores de 2λ (LURTON, 2000).

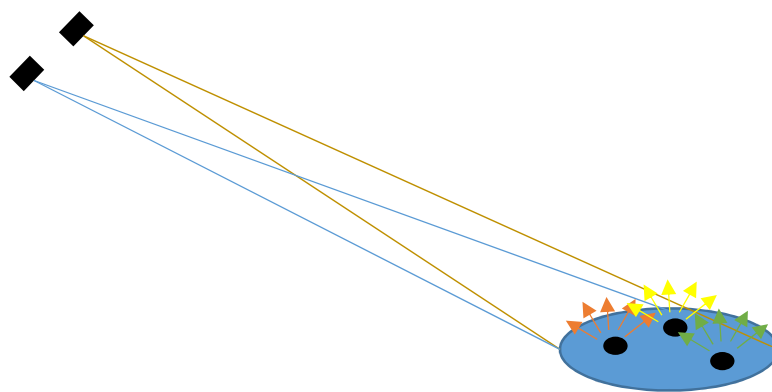


Figura 25 – *Baseline Decorrelation Effect*. Em preto estão representados os pontos difratores. Cada ponto gerará um sinal de retroespalhamento diferente (representado pelos ecos em vermelho, amarelo e verde) e em várias direções.

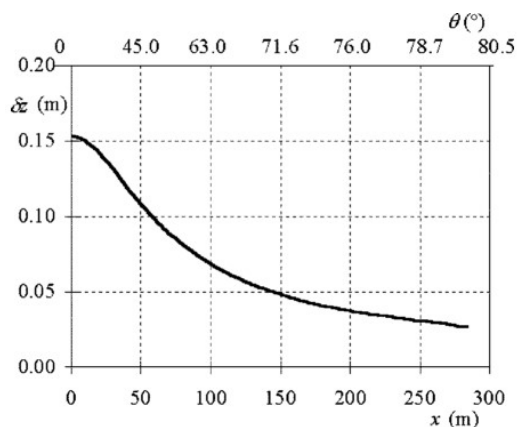


Figura 26 – Incerteza da profundidade (eixo y , em metros) em função da distância nadiral (eixo x abaixo, em metros) e do ângulo oblíquo (eixo x acima, em graus) devido à falta de correlação entre as linhas de base.
Fonte: LURTON (2000).

2.4.3 Efeito da mudança de footprint

O efeito da falta de correlação entre as linhas de base parte do princípio que ambos os sensores estão recebendo o eco do mesmo *footprint*. Entretanto, tal premissa é injustificada (LURTON, 2000). Como a fase é comparada em um mesmo instante, o trecho imageado não pode ser o mesmo, desde que a distância entre o ponto difrator e o receptor A e B não são as mesmas (a menos que o ponto difrator ou o centro do *footprint* estejam no eixo do interferômetro. Nesse caso, o efeito de mudança de *footprint* é zero). Assim, cada eco gerado pelo sinal emissor terá uma reflexão em A e para um mesmo instante terá outra em B. Como a distância do fundo marinho até o receptor A é menor do que ao receptor B, para o mesmo instante, o *footprint* de A é mais longe do receptor que o de B (considerando fundo plano) (Figura 27).

O efeito de mudança de *footprint* dependerá do espaçamento entre os receptores¹⁴, altitude e ângulo de incidência. Na prática, o que é usado para a diferença de fase é o que há em comum entre os *footprints* (Δx). A diferença entre os *footprints* (dx) atua como ruído (LURTON, 2000).

¹⁴ Quanto maior for o espaçamento entre os receptores, maior será o efeito de mudança de *footprint*. Entretanto, foi visto anteriormente que quanto maior o espaçamento, maior a acurácia. Ocorre que o efeito da mudança do *footprint* limita um pouco esse princípio, contudo, este efeito é menos maléfico para a acurácia do que um menor espaçamento entre os receptores (LURTON, 2000).

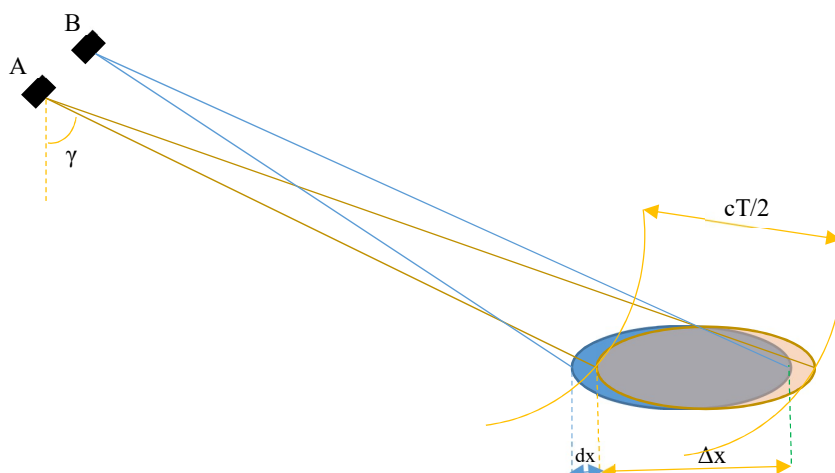


Figura 27 – *Shifting Footprint Effect*. A distância $\Delta x = cT/(2sen\gamma)$, onde c é a velocidade média do som na água, T é o tempo de duração do sinal ou o inverso da largura de banda (caso de um sinal modulado) e γ é a inclinação do eixo do interferômetro. A distância dx é a diferença entre os dois footprints.

Contudo, isso não quer dizer que o efeito da falta de correlação não ocorra, mas que ambas ocorrem concomitantemente. Em uma largura de pulso maior, maior será o efeito da falta de correlação entre as linhas de base para ângulos de baixa obliquidade, enquanto para alta obliquidade, o efeito predominante é o da mudança de *footprint*, independente da largura de pulso. Deve-se levar em conta, ainda, a altitude do sensor. Quanto menor a altitude, maior o efeito da falta de correlação de linha de base (Figura 28). Em um sonar batimétrico, utiliza-se uma largura de pulso pequena (mais sensível ao efeito da mudança de *footprint*), de modo a se ganhar em resolução angular, mas em águas rasas, o que diminui a altitude do sensor (mais sensível ao efeito da falta de correlação de linha de base), de modo que ter-se-á os dois efeitos interagindo no sinal de retorno (LURTON, 2000).

A Figura 28 mostra modelos de incerteza da medida de diferença de fase em função da distância nadiral e do ângulo oblíquo. Nos quadros, tem-se a simulação diferença de fase de um retroespalhamento e os modelos numéricos da falta de correlação de linha de base e da mudança de *footprint*. À esquerda, tem-se a mesma configuração da Figura 26 com uma largura de pulso $T=0,5$ ms. A simulação do retroespalhamento segue o modelo do efeito da mudança de *footprint*. À esquerda, tem-se a mesma configuração anterior, porém o sensor está a 20 metros de altitude e a largura de pulso foi alterada para $T=5,0$ ms. O efeito da mudança de *footprint* pode ser sentido a partir da distância nadiral de 100 metros. Reparar que em ambos os quadros, por volta do ângulo de 75° , que corresponde ao eixo do interferômetro.

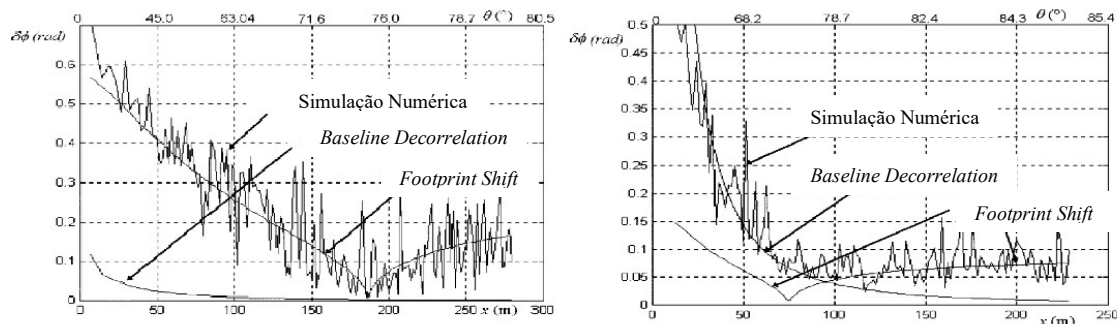


Figura 28 – Modelos de incerteza da medida de diferença de fase em função da distância nadiral e do ângulo oblíquo. Fonte: adaptado de LURTON (2000).

2.4.4 Ambiguidade de mesma distância (layover) e espaço do nadir (nadir gap)

O último problema a ser analisado deriva do fato de dois pontos do fundo marinho terem a mesma distância do sensor com a tolerância da largura de pulso do sinal emitido (SAUCAN et al., 2015). Isso faz com que dois pontos distintos sejam lidos como um só ponto (WOOCK; FREY, 2010), pois chegam a sensor ao mesmo tempo. Assim, a fase de ambos os pontos será computada como se fosse de um só, sendo combinadas irreversivelmente (ĂRĂCIN; CALIN, 2000), de modo a fornecer um resultado aleatório que não reflete nenhum dos ângulos corretos (Figura 29). Esses pontos não terão uma solução batimétrica (ĂRĂCIN; CALIN, 2000) e serão apresentados como se fossem ruídos.

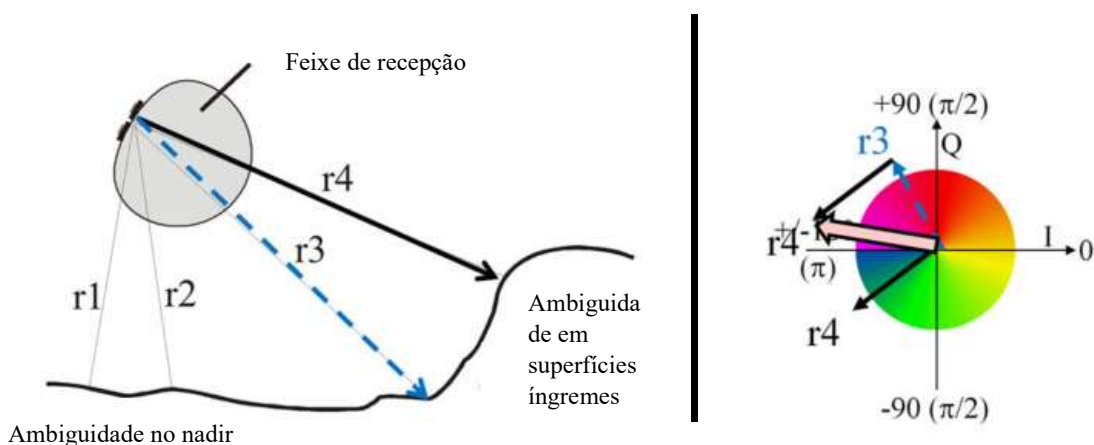


Figura 29 – O primeiro quadro mostra um desenho esquemático da geometria de interação dos feixes com o fundo marinho, no qual $r1=r2$ e $r3=r4$. No segundo quadro está o cálculo de fase para $r3$ e $r4$, mostrando que o resultado será uma fase totalmente diferente. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

Existem duas situações em que tal fenômeno pode ocorrer: no nadir e em superfícies muito íngremes (Figura 30 e Figura 31). Isso pode ser visto muito claramente em imagens batimétricas adquiridas com o PDBS, nas quais o nadir apresenta um resultado com pouca densidade de informações.

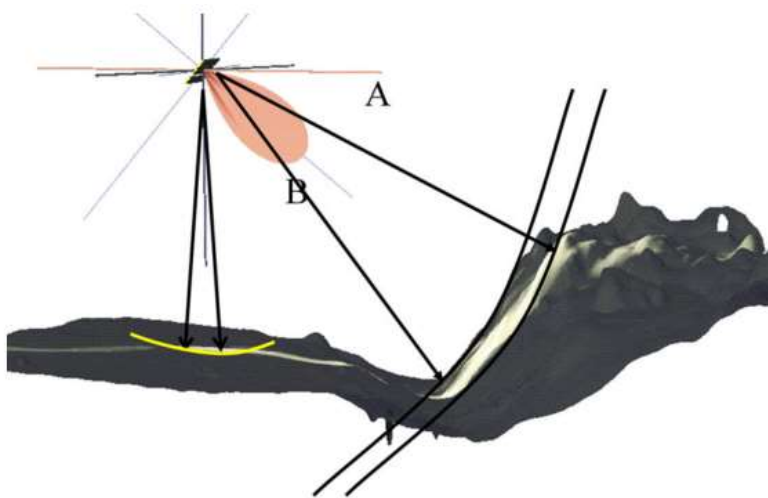


Figura 30 – Os pontos compreendidos entre os raios A e B tem a mesma distância (dentro de uma largura de pulso) do sensor. Todos esses pontos serão lidos como se fossem apenas um e todos os sinais de retorno serão utilizados para cálculo da diferença de fase. Com isso, seu valor será aleatório e não terá uma solução batimétrica. O problema do espaço do nadir também deriva do mesmo princípio. Fonte: CLARKE (2013a).

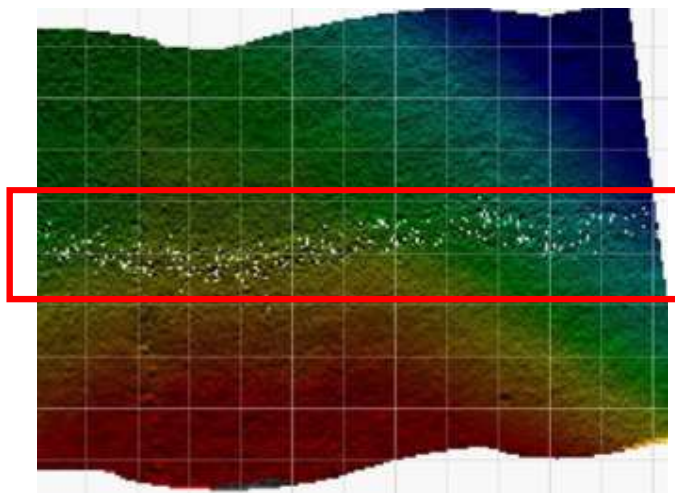


Figura 31 – Superfície batimétrica gerada a partir de dados adquiridos com PDBS. No quadrado em vermelho se nota a pouca densidade de dados na região nadiral. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

2.5 COMPARAÇÃO ENTRE ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE E SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO

Desde que foram entendidos os princípios de detecção do MBES e do PDBS, a questão que surge é como seria a performance de ambos? Pelo fato de o ecobatímetro multifeixe ser uma técnica já consagrada, é natural que ele sirva de base de comparação para sondagens com o sonar de varredura lateral interferométrico. Já houve outras pesquisas nesse sentido, principalmente de empresas fabricantes do PDBS, em prol de tentar mostrar que estes podem tanto alcançar as incertezas preconizadas pela OHI como para mostrar que podem substituir, com vantagens, o multifeixe.

Em 2005, Gostnell (2005) realizou uma comparação entre um PDBS (*GeoAcoustics Geoswath*) e dois MBES (*Kongsberg EM3002* e *Reson SeaBat 8125*). Em 2007, Gostnell, Yoos e Brodet (2007) fizeram uma ampla comparação entre os sensores, usando três sistemas PDBS (*GeoAcoustics Geoswath*, *SEA Swathplus* e *Teledyne Benthos C3D*) e um sistema MBES (*Reson SeaBat 8125*). Em 2010 e 2014, o Serviço Geológico Americano (*United States Geological Service – USGS*) publicou o relatório de uma série de levantamentos realizados nos anos de 2001 e 2004, respectivamente, com o PDBS *SEA Swathplus-H* (DEWITT et al., 2014, 2010; PFEIFFER et al., 2010). Em 2011, Madricarlo, Foglini e Tonielli (2011) realizaram um estudo comparativo em Veneza, utilizando dois PDBS (*GeoAcoustics GeoswathPlus*, nas frequências de 250 e 500 KHz). Em 2013, Dodd fez um levantamento batimétrico comparativo entre o PDBS *Edgetech 4600* e o MBES *Reson 7125* (DODD, 2013). Em 2014, Brisson, Wolfe e Staley (2014) fizeram um levantamento com o PDBS *EdgeTech 6205*, comparando-o com um sistema multifeixe (não especificado). Em 2015, Ai, Armstrong e Fleury (2015) realizaram um levantamento teste para a NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) como o PDBS *Klein HydroChart 3500*. Ainda neste ano, Jerram e Schmidt (2015b) realizaram análises de levantamentos com o PDBS *GeoAcoustics GeoswathPlus* para um levantamento batimétrico pós tempestade. Em 2016, Ma, Xu e Xu (2016) compararam o PDBS *GeoAcoustics GeoswathPlus* com o MBES *Sonic 2022*.

Todos estes levantamentos geraram uma série de resultados comparativos onde propõem o uso de um sensor ou de outro, dependendo do meio utilizado e da finalidade do levantamento hidrográfico (LH). Tais tentativas mostram a atualidade da avaliação do uso do PDBS e de como ele ainda sustém controvérsias quanto a levantamentos batimétricos.

Um grande exemplo é que alguns países têm posicionamentos diferentes quanto ao uso do sonar de varredura lateral interferométrico no que tange a aplicação em levantamentos batimétricos destinados à atualização da carta náutica.

Os Estados Unidos têm um posicionamento controverso. A USACE (*United States Army Corps of Engineers*) autoriza o seu uso para o LH em rios (USACE, 2013). Já a NOAA não autoriza, a não ser com autorização do chefe da Divisão de Levantamentos do Escritório de Levantamentos Hidrográficos Costeiros. A NOAA alega que o dado contém uma incerteza que ultrapassa o preconizado para a Carta Náutica e que alguns sistemas são incapazes de realizar uma detecção confiável dentro dos parâmetros estabelecidos por ela (NOAA, 2017). Mesmo assim, existem trabalhos dentro da NOAA que sugerem que esses tipos de levantamentos sejam aceitos para a cartografia (BONGIOVANNI; SCHMIDT, 2016).

O Canadá já aceita o PDBS, desde que o levantamento atinja seus parâmetros¹⁵ (CHS, 2008). Como já mencionado, o Brasil também não aceita LH realizados com este equipamento.

¹⁵ O manual *Canadian Hydrographic Service - STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS* preconiza vários parâmetros para que um LH possa ser aceito para fins cartográficos. A publicação não fala expressamente em qualquer tipo de sonar interferométrico, mas explicita que qualquer varredura acústica é considerada como cobertura completa do fundo marinho.

3. METODOLOGIA

3.1 PLANEJAMENTO E ÁREA DOS TESTES

Em prol de uma avaliação da performance do PDBS em águas brasileiras, foi elaborada uma metodologia para avaliar determinadas capacidades do sensor interferométrico, tendo como base um levantamento com MBES realizado concomitantemente. Metodologias semelhantes foram aplicadas em outros testes (BRISSON; WOLFE; STALEY, 2014; GOSTNELL, 2005; GOSTNELL; YOOS; BRODET, 2007).

O objetivo deste levantamento foi coletar dados batimétricos e de *backscatter* para avaliação do uso do sonar de varredura lateral interferométrico, principalmente em relação a seus dados batimétricos. Para isso será utilizado *sidescan sonar* (SSS) interferométrico montado em uma embarcação por meio de uma haste e um ecobatímetro multifeixe já orgânico da lancha (OHI, 2005).

Como área de aquisição de dados, foram escolhidos 5 locais dentro da Baía de Guanabara (Figura 32). Estes têm características que propiciam a avaliação dos quesitos propostos, como ver-se-á a seguir. A escolha da Baía de Guanabara, como área de testes, tem cunho logístico e estratégico: logístico pelo fato da proximidade com a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e com a Universidade Federal Fluminense (UFF), o que possibilita percorrer pequenas distâncias para se chegar aos locais de teste, prover local para guarda da embarcação e dos equipamentos e a não necessidade do pernoite; estratégico pelo fato de que, após estes testes, poder-se-á ter uma área e metodologia para avaliação de equipamentos e procedimentos, bem como conclusões sobre os mesmos.

A Baía de Guanabara tem 384 km² de costa, com um canal central de aproximadamente 30 metros de profundidade. Seu fundo é constituído de areia quartzosa na entrada, perto da comunicação com o Oceano Atlântico, refletindo os efeitos de onda e maré. Sua profundidade média é de 5,7 metros. O restante do fundo marinho, com exceção da entrada da baía, é majoritariamente lama, resultante de transgressão do Holoceno e da sedimentação fluvial (KJERFVE et al., 1997).

Primeiramente se pensou em fazer uma área teste na Baía de Guanabara, com alvos fabricados em tamanhos pré-definidos e colocados em locais com profundidades e tipo de fundo já conhecidos, de forma a fornecer parâmetros para testar diversas funcionalidades e características de diferentes sensores. Entretanto, tais alvos podem gerar multicaminamento

do sinal¹⁶ acústico, chegando a formar vários ecos de retorno. Uma alternativa à criação desses alvos era que eles fossem todos feitos de concreto, mas seu peso faria com que fosse inexecuível sua movimentação. Por fim, após sugestão e subsídios do Prof. John Hughes Clarke¹⁷ (CLARKE, 2017), foi decidido pela escolha de alvos e feições naturais, mesmo que estejam espalhados e não concentrados em um só local. Cada área foi escolhida de acordo com suas características, de modo a explicitar o parâmetro a ser avaliado.

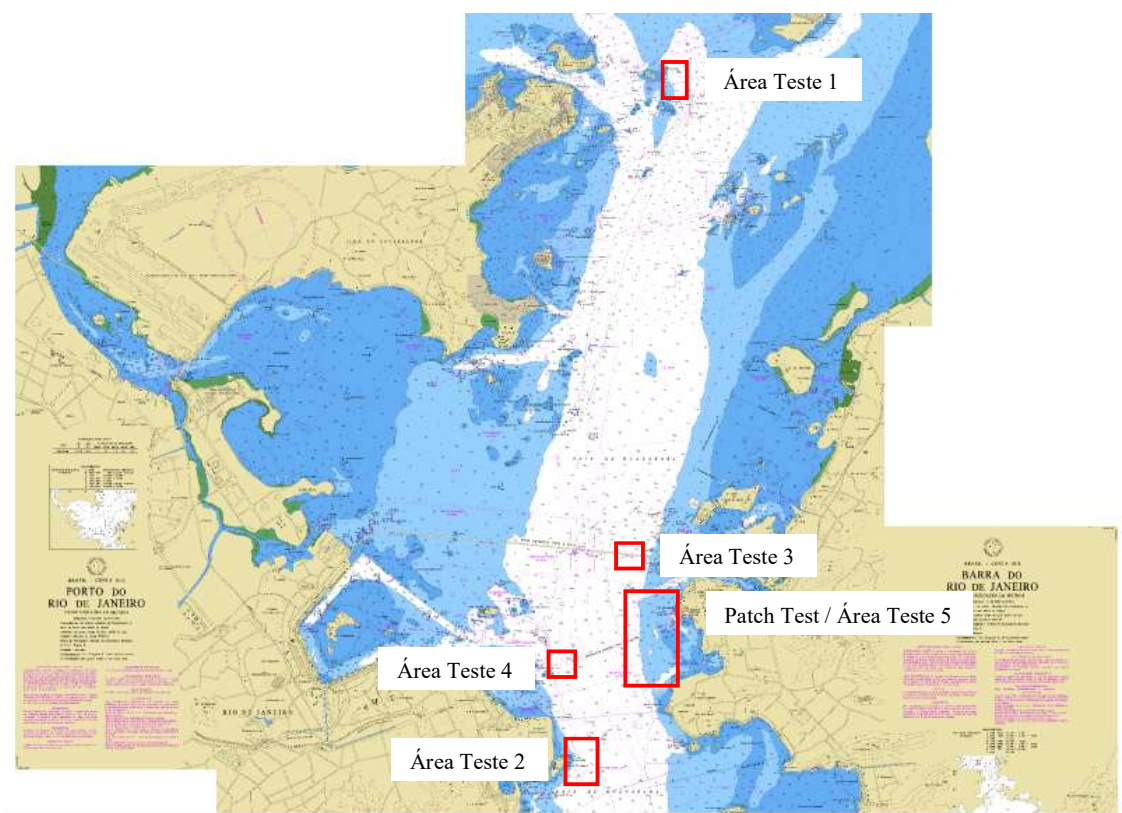


Figura 32 – Baía de Guanabara e as áreas a serem realizados os testes (em retângulos vermelhos). A imagem é resultado de uma composição dos extratos das cartas náuticas n° 1511, 1512 e 1513.

¹⁶ Multicaminhamento do sinal é um fenômeno no qual o feixe sonoro não percorre a trajetória direta transdutor – alvo/feição – transdutor. Nesse interregno, o sinal pode refletir em outras superfícies. Exemplo clássico de multicaminhamento são quando o sinal reflete na camada limite ente o meio líquido e o ar (superfície) (Denbigh, 1989), fazendo com que a trajetória do sinal fique maior e mudando significativamente o TWTT e a fase do sinal. No caso aqui citado, o multicaminhamento se daria devido à penetração do sinal na estrutura construída, fazendo com que sejam gerados ecos múltiplos.

¹⁷ Acadêmico e professor da Universidade de *New Hampshire*. Notório estudioso de batimetria e sensores batimétricos.

3.1.1 *Patch Test*

O *patch test* é um procedimento que se destina a verificar os erros residuais de *roll*, *pitch* e *yaw* que não foram retirados durante a instalação do equipamento de sondagem na embarcação. Também visa a determinação do tempo de latência (*time delay*) do sistema de posicionamento. Deve ser realizado após a instalação dos sensores ou após grande período de inoperabilidade (OHI, 2005).

Para realização do *patch test*, foram escolhidas duas áreas que tivessem fundo plano e regulares para a calibração de *roll* e inclinados ou com feições batimétricas bem definidas (por exemplo, rochas aflorantes sobre o fundo) para a calibração de *time delay*, *pitch* e *yaw* (OHI, 2005).

A metodologia escolhida para o procedimento foi a sondagem de duas áreas (Figura 33 e Tabela 2). A primeira servirá para a medição dos *offsets* e a segunda para a confirmação dos mesmos.

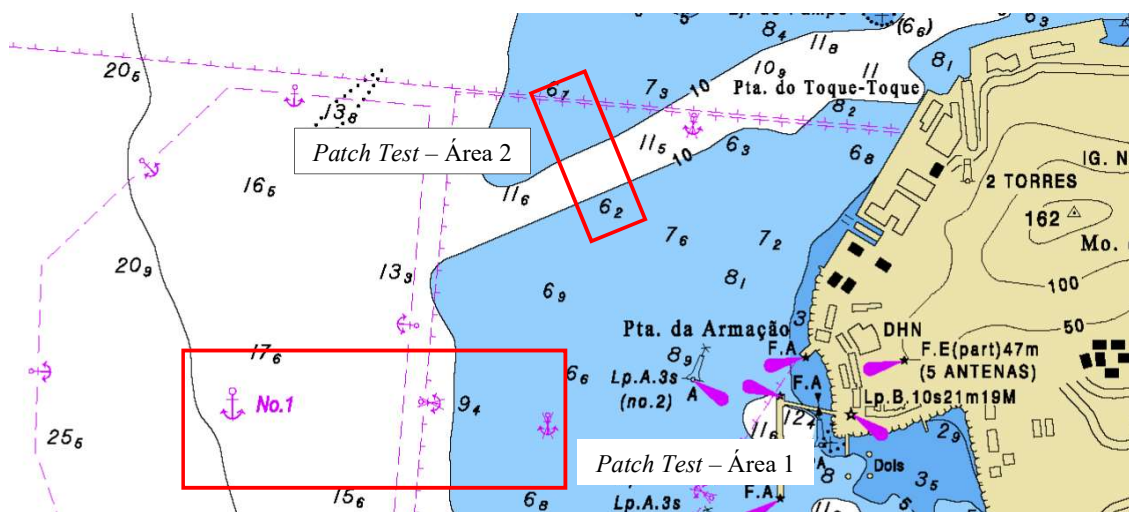


Figura 33 – Áreas do patch test.

Tabela 2 – Coordenadas das áreas do patch test.

Coordenadas	Patch Test – Área 1	Patch Test – Área 2
Canto NW	$\varphi = 22^{\circ} 53',01S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',91W$	$\varphi = 22^{\circ} 52',68S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',46W$
Canto SE	$\varphi = 22^{\circ} 53',17S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',42W$	$\varphi = 22^{\circ} 52',84S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',30W$

3.2 TESTE DE DETECÇÃO DE ALVOS – ÁREA 1

Este teste visa verificar a capacidade de detecção e delineamento de feições batimétricas. Neste propósito, foi escolhida uma área de aproximadamente 750 m x 500 m, rica em blocos rochosos (pedras) dos mais variados tamanhos e formas, em uma profundidade média de 13 metros (Figura 34 e Tabela 3).

Quanto menor for a profundidade, menor deve ser a feição para que se simule as características da Ordem Especial da OHI (Tabela 1). Nesta ordem, na profundidade máxima de 40 m, a capacidade de detecção deve ser de 1 m³. Seguindo esse raciocínio, a feição deve ter 2,5% da profundidade. Assim, para simular o desempenho requerido na Ordem Especial, o ideal seria ter uma rocha que tivesse 32,5 cm de comprimento (considerando profundidade de 13 metros). Porém é praticamente impossível se obter as dimensões de uma rocha submersa por medição direta. Mesmo com o uso de mergulhadores, é muito difícil discernir qual rocha exatamente está sendo medida em um local repleto de tais feições. Alia-se a isto o fato de a visibilidade da água na Baía de Guanabara ser de aproximadamente 1 metro na maior parte do tempo. Dessa forma, nesse teste, tomar-se-á como medida padrão das feições obtidas com o MBES. Contudo, mesmo com essa referência, é praticamente impossível medir rochas desse tamanho.

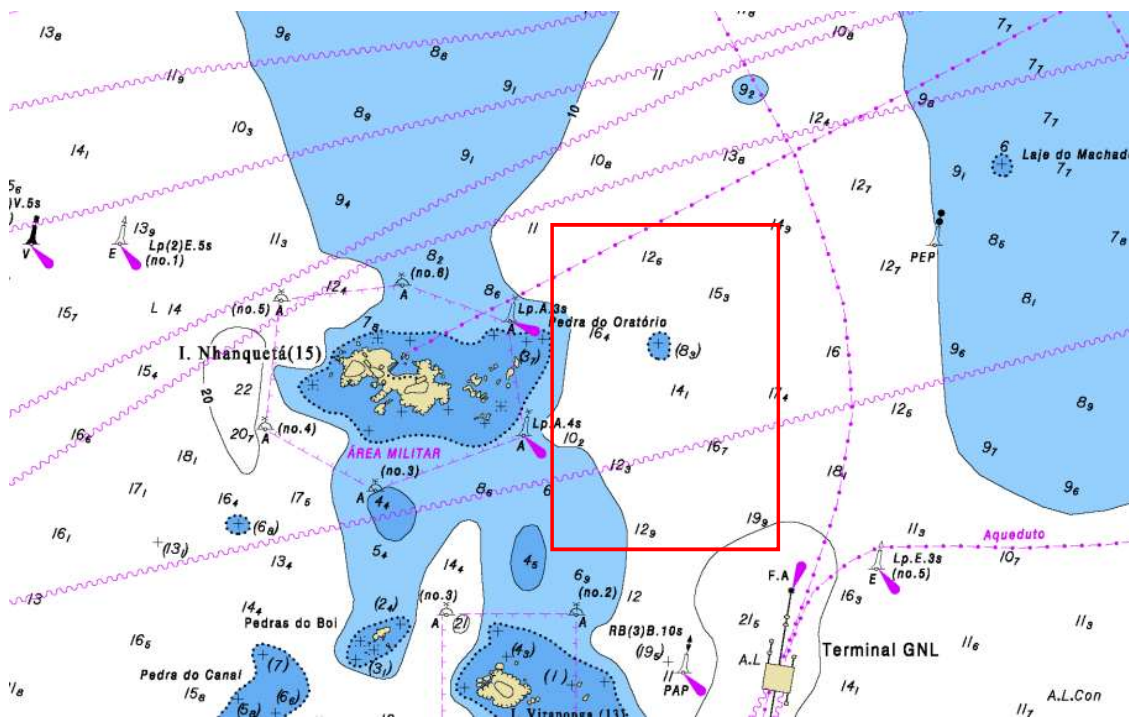


Figura 34 – Área 1. Apesar de parecer, na Carta Náutica, que a área possui apenas uma rocha, foi verificado em sondagens mais antigas que este local está repleto destas¹⁸.

Tabela 3 – Coordenadas e tença da área 1.

Coordenadas	Área 1
Canto NW	$\varphi = 22^{\circ} 46',40S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',21W$
Canto SE	$\varphi = 22^{\circ} 46',81S$ $\lambda = 043^{\circ} 07',91W$
Tença	Argila, areia e lama

3.2.1 Teste de inclinação – Área 2

Este teste tem como objetivo verificar a capacidade do PDBS de resolver inclinações desde as mais suaves até as mais abruptas. A área escolhida foi uma região de cerca de 550 m x 700 m nas proximidades da Ilha de Villegagnon – RJ (Figura 35 e Tabela 4).

Neste local, pode-se observar profundidades que variam de 39 m à 1,5 m, o que produz uma inclinação bem pronunciada. Em outros locais, dentro da mesma área, a profundidade varia

¹⁸ Tal fato ocorre devido a uma generalização cartográfica, onde é evidenciado apenas a feição mais rasa e perigosa, já que as demais possuem feições mais reduzidas.

mais suavemente. Dessa forma, são abrangidos diversos gradientes de inclinação, fornecendo material para análise e cálculo de diferentes situações.

Um óbice que ocorreu foi a dificuldade em ensonificar as profundidades mais rasas devido ao risco à navegação. Para poder se alcançar as áreas de menor profundidade, a lancha tinha que ser exposta a um maior perigo de encalhe ou albaroamento, o que dificultou o procedimento. Contudo, pode-se ensonificar o suficiente para uma avaliação.

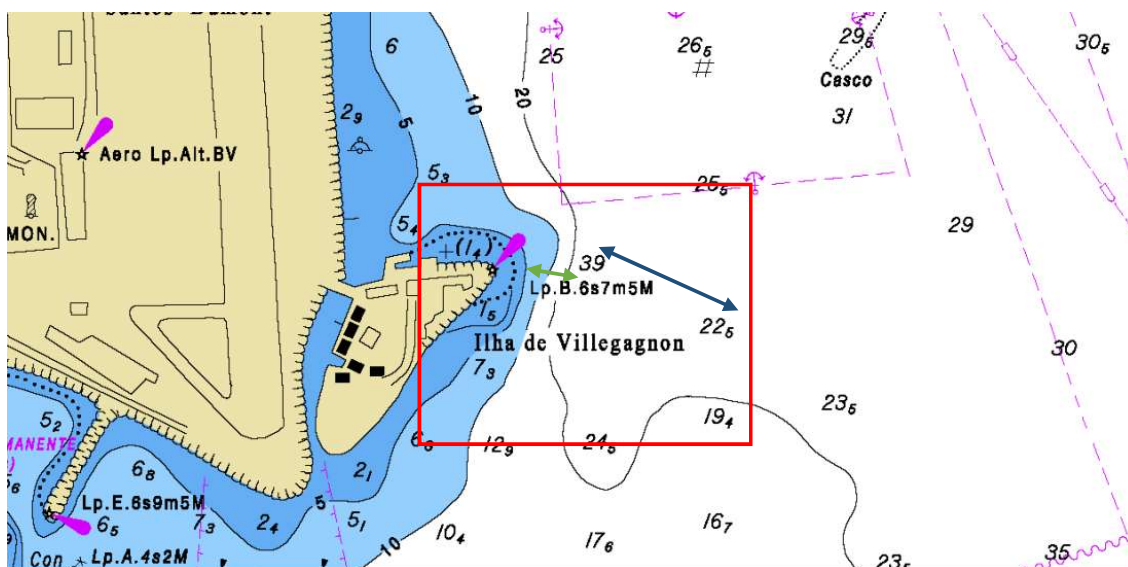


Figura 35 – Área 2. A seta em azul indica a direção no qual o gradiente é mais suave. A seta em verde indica local em que o gradiente é mais pronunciado.

Tabela 4 – Coordenadas e tença da área 2.

Coordenadas	Área 2
Canto NW	$\varphi = 22^{\circ} 54',66S$ $\lambda = 043^{\circ} 09',56W$
Canto SE	$\varphi = 22^{\circ} 54',97S$ $\lambda = 043^{\circ} 09',14W$
Tença	Areia e lama

3.2.2 Teste de detecção de objetos aflorantes acima d'água – Área 3

Este teste visa verificar até que altura o PDBS consegue detectar um objeto que se pronuncie para fora da superfície do mar. A detecção de objetos com grande projeção vertical

é um fator fundamental para a segurança da navegação. Assim, foram designados dois testes: o primeiro teste para verificar até qual distância, relativamente ao transdutor, o sensor consegue detectar um objeto vertical. Sabe-se que este objeto está vindo até a superfície, de modo que a detecção máxima seria o 0 m de profundidade. Tal parâmetro servirá de base para verificar como os sensores podem detectar objetos e até que altura. Para tal, foi escolhida uma área de aproximadamente 250 m x 400 m em uma profundidade média de 15 metros (Figura 36 e Tabela 5), englobando 5 pilares da Ponte Presidente Costa e Silva (popularmente conhecida como Ponte Rio-Niterói).

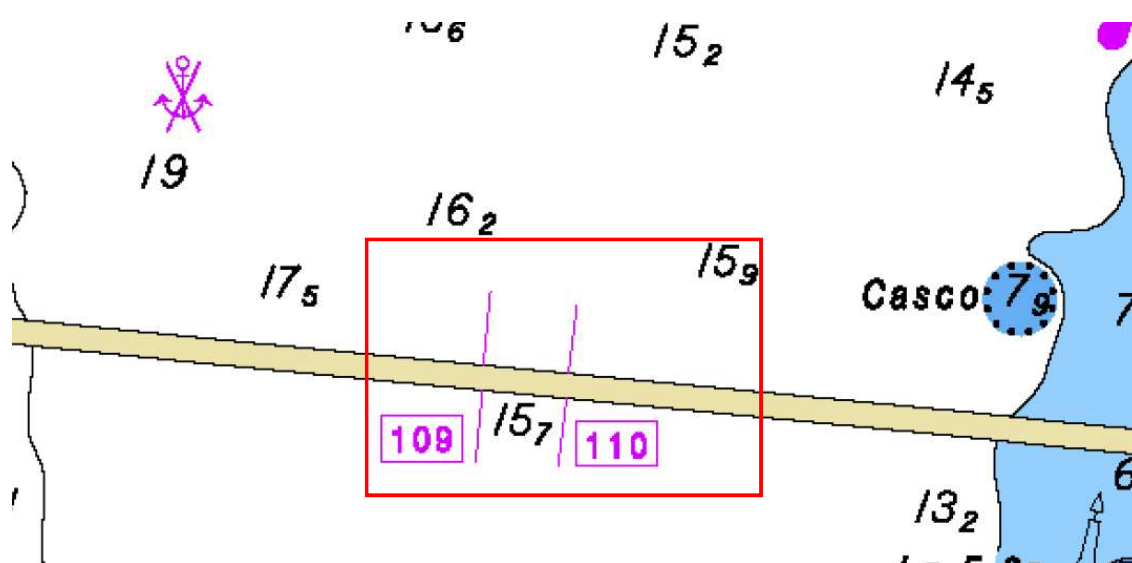


Figura 36 – Área 3.

Tabela 5 – Coordenadas e tença da área 3.

Coordenadas	Área 3
Canto NW	$\varphi = 22^{\circ} 52',25S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',82W$
Canto SE	$\varphi = 22^{\circ} 52',40S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',55W$
Tença	Areia e lama

3.2.3 Teste de detecção de objetos naufragados – Área 4

Os objetos naufragados podem constituir grandes perigos ao navegante. Para contornar esta dificuldade, o objeto deve estar mapeado e discriminado na carta náutica. A profundidade

que será a representativa do todo, será a menor profundidade encontrada na feição. Esta costuma ser resultante de feições verticais do objeto naufragado, tais como mastros.

Nesse contexto, este teste, de forma análoga ao anterior, busca a detecção das menores profundidades de um objeto naufragado que tenha uma feição vertical pronunciada, mas que não chegue ao lume d'água. Do mesmo modo do Teste 1, o material de comparação será os dados provenientes do ecobatímetro multifeixe.

Para este teste, foi escolhida uma área de cerca de 600 m x 550 m, nas proximidades da Ilha Fiscal – RJ, com uma profundidade média de 30 metros, englobando um casco soçobrado¹⁹ submerso (DHN, 2014) que tem como menor profundidade 20,8 metros (Figura 37 e Tabela 6).

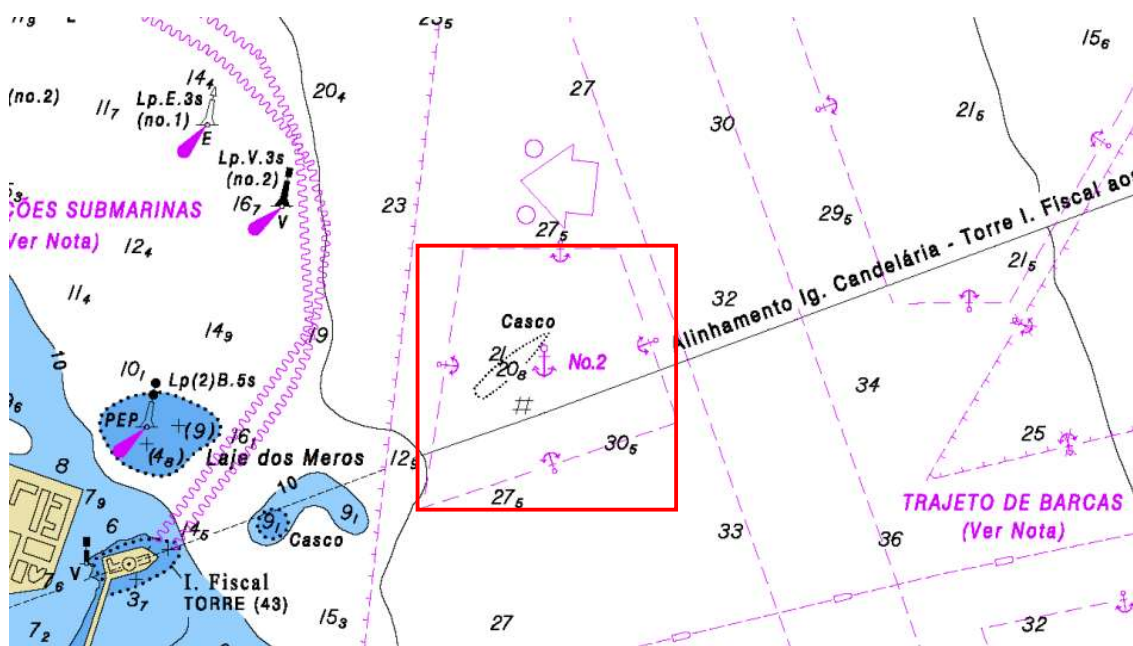


Figura 37 – Área 4.

Tabela 6 – Coordenadas e tença da área 4.

Coordenadas	Área 4
Canto NW	$\varphi = 22^{\circ} 53',43S$ $\lambda = 043^{\circ} 09',58W$
Canto SE	$\varphi = 22^{\circ} 53',74S$ $\lambda = 043^{\circ} 09',25W$
Tença	Areia e lama

¹⁹ Casco soçobrado é o restante de um navio naufragado.

3.2.4 *Teste de eficiência – Área 5*

Este teste objetiva a verificação da eficiência do PDBS comparativamente ao MBES. Será realizada uma sondagem respeitando os parâmetros de sondagem (principalmente espaçamento entre linhas) do interferométrico. Sabe-se pela literatura, que o PDBS tem uma varredura máxima de aproximadamente 10-12 vezes a profundidade, enquanto que o MBES tem de 5-6 vezes a profundidade (JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Assim, o que se deseja testar é a varredura útil e a eficiência do PDBS.

Para esta verificação foi escolhida uma área plana de aproximadamente 1.750 m x 800 m, com profundidades variando de 15 a 3 metros, nas cercanias da Ponta da Areia, em Niterói – RJ (Figura 38 e Tabela 7).

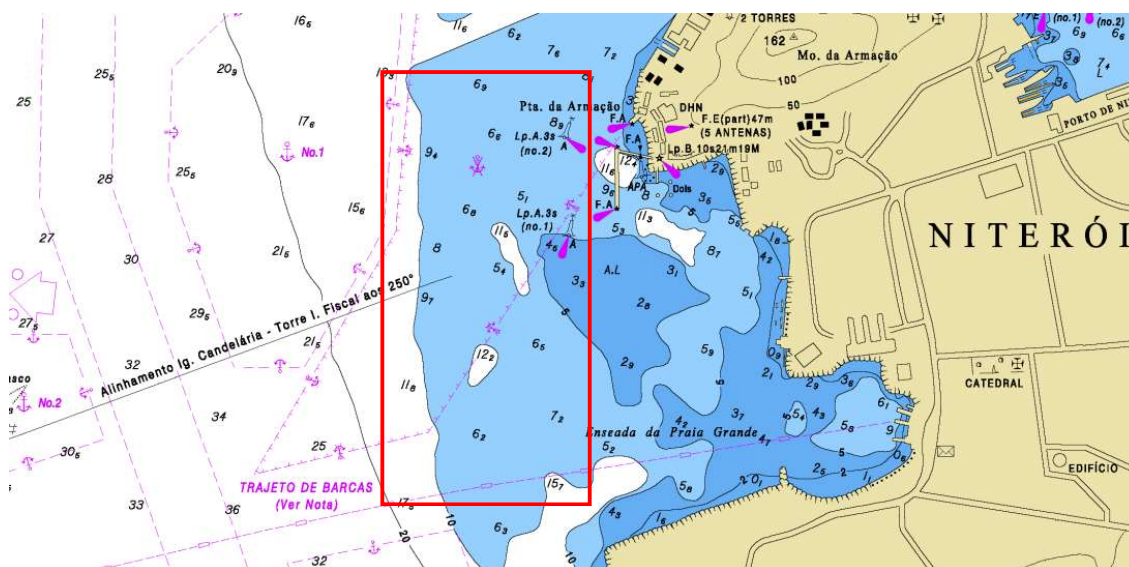


Figura 38 – Área 5.

Tabela 7 – Coordenadas e tença da área 5.

Coordenadas	Área 5
Canto NW	$\varphi = 22^{\circ} 52',86S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',66W$
Canto SE	$\varphi = 22^{\circ} 53',79S$ $\lambda = 043^{\circ} 08',18W$
Tença	Areia e lama

3.2.5 Teste de resolução

Este teste não tem uma área específica, visto que não busca a detecção de alguma característica ou feição do fundo marinho. Nele, se verificará qual é a resolução e densidade de informações batimétricas por metro quadrado de cada sensor. Quanto mais informações de profundidade houverem, mais confiável será a profundidade representativa.

3.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Tendo sido escolhidos os testes e as áreas, utilizou-se a Lancha CEHILI (Figura 39), embarcação orgânica do Navio de Pesquisas Hidroceanográfico (NPqHo) Vital de Oliveira.

A montagem e calibração dos sensores (*patch test*) foram realizadas nos dias 31 de julho e 01 de agosto de 2017. A sondagem das áreas testes foi feita nos dias 02 e 03 de agosto do mesmo ano.



Figura 39 – Lancha CEHILI sendo retirada do NPqHo Vital de Oliveira para ser posta na água.

3.3.1 *Sonares e periféricos*

A lancha CEHILI já tem um multifeixe instalado no casco da embarcação, havendo apenas a necessidade de se instalar o PDBS em uma haste (Figura 40) para poder acoplá-lo à lancha (Figura 41).



Figura 40 – Sonar de varredura lateral Geoacustics Geoswath 4R instalado em haste. À direita, no círculo vermelho tem-se o sensor de movimento e no amarelo o sensor de velocidade do som na face do transdutor.

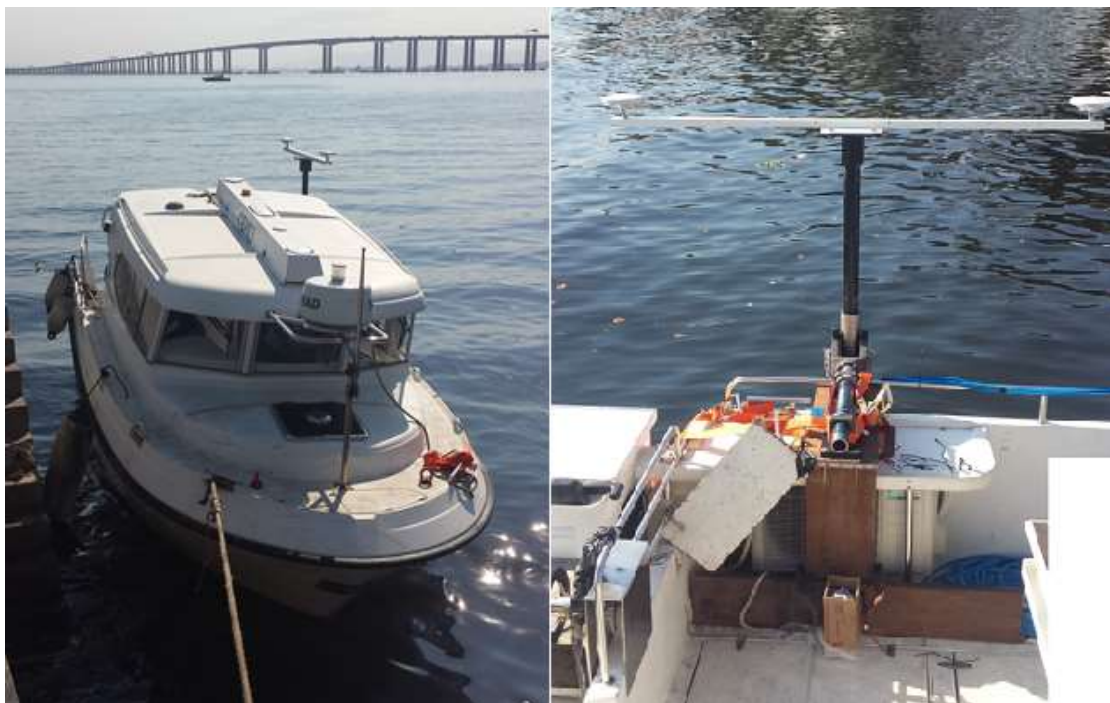


Figura 41 – Lancha CEHILI com a haste instalada.

Para a realização dos testes comparativos foram escolhidos os seguintes equipamentos e softwares:

Ecobatímetro multifeixe *Kongsberg EM2040* nas respectivas configurações:

- Frequência central: 400 KHz;
- Ângulo de abertura: 120° (60° para cada bordo). No teste 3 foi mudado para 75° o bordo que faceou os pilares da ponte;
- Máxima varredura: 600 metros (300 metros para cada bordo);
- Espaçamento dos feixes: *High Definition Equidistant* (HD EQDST);
- Profundidade mínima: 1 metro;
- Profundidade máxima: 30 metros. No teste 2 foi mudado para 50 metros devido às profundidades locais;
- Estabilização em *pitch*;
- Estabilização em *yaw*;
- Frequência de transmissão máxima: 50 Hz;
- Equipamento periféricos:

- Sensor de movimento: *Kongsberg Seapath 300* com *MRU5*, com antenas de *heading* separadas em 2,582 m;
- Posicionador: *Seapath 300*;
- Sinal diferencial de posição: *DGNSS 3710 Fulgro* (1 m);
- Sensor de velocidade do som na face do transdutor: *AML Micro X*; e
- Software de navegação e aquisição: *SIS*, versão 4.3.2.

Sonar de varredura lateral *Kongsberg Geoacustics Geoswath 4R* nas respectivas configurações:

- Frequência central: 250 KHz;
- Não foi ajustada nenhuma outra configuração. A doutrina de aquisição de dados que foi passada pelo Sr. James Baxter, operador da empresa *Geoacustics*, consistia em que os dados fossem adquiridos sem nenhum ajuste e que fossem tratados em etapa posterior, durante o processamento, nos mesmos moldes do processamento realizado pela Empresa *Kongsberg Maritime*;
- Equipamentos periféricos:
 - Sensor de movimento: *Aplanix POS MV WAVE MASTER 2*, com antenas de *heading* separadas em 1,9 m;
 - Posicionador: *Aplanix POS MV WAVE MASTER 2*;
 - Sinal diferencial de posição: *RTK Marinestar Fulgro* (10 cm);
 - Sensor de velocidade do som na face do transdutor: *Valeport Mini SVS 25 mm*;
 - Software de aquisição: *Geoswath Plus*, versão 1.0.21.14560; e
 - Software de navegação: *Hypack 2017*.

3.3.2 Perfil de velocidade do som

A informação de perfil de velocidade do som foi adquirida pelo sensor *AML Minos X*, sendo realizada a estratificação de camadas com resolução de 10 cm. O processamento dos arquivos foi realizado no software *SIS* versão 4.3.2 e as informações foram inseridas nos dados durante a aquisição, no caso do MBES, e no processamento, no caso do PDBS. Foram realizadas, no total, 11 lançamentos conforme Tabela 8 e Figura 42.

Os perfis foram adquiridos antes da sondagem em cada área e no caso da informação de velocidade do perfil de velocidade do som na altura do transdutor variasse mais de 2 m/s da informação do sensor de velocidade do som na face do transdutor.

Tabela 8 – Lançamento SVP. Os lançamentos 6 e 7 (vermelho) não foram utilizados.

Lançamento	Dia	Hora (Z)	Posição		Local Aplicado	Observação
			Lat	Long		
#1	01/08	1905	22°53',101 S	043°08',891 W	Patch Test 1	Início de sondagem na área
#2	01/08	2053	22°52',770 S	043°08',411 W	Patch Test 2	Início de sondagem na área
#3	02/08	1251	22°54',813 S	043°09',295 W	Área 2	Início de sondagem na área
#4	02/08	1351	22°54',876 S	043°09',360 W	Área 2	Vel.som. variou em relação ao SVP
#5	02/08	1453	22°53',698 S	043°09',379 W	Área 4	Início de sondagem na área
#6	02/08	1800	22°53',241 S	043°08',661 W	Área 5	Esses dois perfis estavam variando muito em relação à vel.som. Depois se verificou que o sensor estava na termoclina, o que explica a variação, pois com o jogo da lancha, a vel.som. em que estava o transdutor mudava muito. Eles não foram utilizados.
#7	02/08	1809	22°53',256 S	043°08',654 W	Área 5	
#8	02/08	1828	22°53',071 S	043°08',603 W	Área 5	Início de sondagem na área
#9	03/08	1236	22°46',849 S	043°07',943 W	Área 1	Início de sondagem na área
#10	03/08	1506	22°52',277 S	043°08',829 W	Área 3	Início de sondagem na área
#11	03/08	1553	22°52',982 S	043°08',603 W	Área 5	Início de sondagem na área

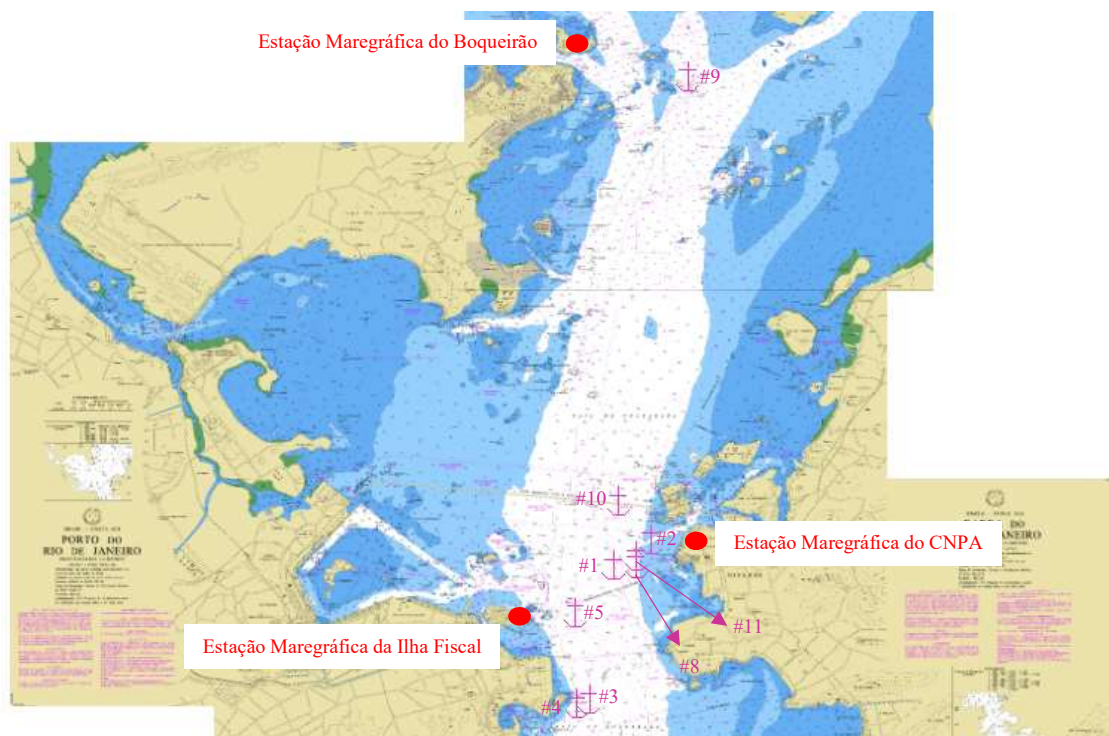


Figura 42 – Pontos nos quais foram adquiridos os perfis de velocidade do som (representados por âncoras magentas) e Estações Maregráficas utilizadas (círculos vermelhos).

3.3.3 Maré

As informações de maré para a redução da sondagem foram coletadas por meio de 3 estações diferentes, devido às distâncias das áreas de sondagem. A Estação Maregráfica do Boqueirão (F41 – Padrão – ILHA DO BOQUEIRÃO I – 50127 – Versão 1/2017)²⁰, com um marégrafo digital de boia, modelo OTT Thalimedes, foi utilizada para a área 1; a Estação Maregráfica do CNPA (F41 – Padrão – PONTA DA ARMAÇÃO – 50141 – Versão 1/2010), com um marégrafo de boia, modelo hidrológico diário, foi utilizada para Patch Test 1 e 2, áreas 3 e 5; e a Estação Maregráfica da Ilha Fiscal (F41 – Padrão – ILHA FISCAL – 50140 – Versão 1/2010), com um marégrafo de boia, modelo hidrológico diário, foi utilizada para as áreas 2 e 4 (Figura 42).

Para processamento dos dados maregráficos foi utilizado o software *Microsoft Excel 2016* e as informações foram inseridas nos dados durante o processamento. O nível de redução utilizado foi o constante na ficha descritiva de cada estação, sendo de 158,16 cm para a Estação

²⁰ A F41 é uma ficha descritiva da estação maregráfica, contendo todos os seus dados. Pode ser consultada no sítio da internet do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Maregráfica da Ilha do Boqueirão, 119,3 cm para a Estação Maregráfica da Ponta da Armação e 152,5 cm para a Estação Maregráfica da Ilha Fiscal.

3.3.4 Condições de tempo

Durante toda a sondagem o tempo estava bom, vento fraco, oscilando entre nulo e brisa leve. O mar estava calmo, variando de aspecto espelhado à pequenas ondulações, quase imperceptíveis com a lancha (Figura 43). Dir-se-ia que o tempo oscilou entre 0 e 3 na escala *Beaufort*.



Figura 43 – Estado do mar.

3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após a coleta dos dados, os oriundos do MBES foram processados diferentemente dos oriundos do PDBS. Segue a sequência de processamento adotada em ambos.

Ecobatímetro multifeixe *EM2040*:

1. Os arquivos de sondagem (.all) foram importados para o software *CARIS HIPS&SIPS* versão 10.2, respeitando a projeção Geográfica (Mercator) e usando como *datum* o WGS84.
2. Foi criado um arquivo de embarcação (Cehili.hvf) que continha as configurações da lancha e as incertezas dos sensores.
3. Verificadas as informações de posição e atitude.
4. Carregados os dados maregráficos.
5. Realizado o *Merge*.
6. Calculada a incerteza total propagada (*Total Propagated Uncertainty* – TPU), considerando a incerteza da medição da maré em 1 cm, a incerteza do perfil da velocidade do som em 0,5 m/s, a incerteza da velocidade do som na face do transdutor em 0,2 m/s e todas as outras fontes de incerteza provenientes do arquivo de embarcação (Cehili.hvf). Tal procedimento e valores de incertezas são sugeridos pela empresa *CARIS* (CARIS, 2014).
7. Criada uma superfície CUBE, resolução 0,5 m, respeitando os limites da ordem especial (parâmetros a e b – Tabela 1) e método de desigualdade densidade e localização (*Density & Locale*).
8. Aplicado um filtro de superfície CUBE com valor limite da incerteza (*Threshold Type Type Uncertainty*) no valor de 2x (95,44% de certeza) e rejeitando profundidades que não estão na superfície.
9. Foi usada a ferramenta *Subset Editor* para limpeza manual dos dados. O *slice* foi de 5 m, ficando menor em áreas de grandes gradientes ou feições e utilizado zoom de 20 a 50 cm. Nessa etapa, foram retirados vários dados considerados espúrios como também foram habilitados outros tantos.

Sonar de varredura lateral interferométrico *Geoswath 4R*:

1. O processamento desses dados foi realizado em duas etapas diferentes, cada uma em um software. A primeira etapa, eminentemente estatística²¹, foi realizada no

²¹ Devido aos dados batimétricos provenientes do sonar de varredura lateral interferométrico serem extremamente ruidosos, fica impossível uma limpeza manual sem antes aplicar filtros estatísticos e de limites. O procedimento ensinado pela *Kongsberg* em seus cursos e adestramentos de *Geoswath* é uma abordagem puramente focada em filtros, não havendo uma limpeza manual. Esse procedimento foi mantido no trabalho. O software *CARIS* foi usado apenas para criação das superfícies, de modo a comparar superfícies de mesma resolução, criadas com o mesmo interpolador e mesmo algoritmo.

software *Geoswath Plus*, versão 1.0.21.14560, onde foram verificadas as informações de navegação e atitude.

2. Ao contrário do processamento multifeixe, os dados de perfis de velocidade do som foram inseridos no processamento, embora tenham sido os mesmos dados.
3. Inserido maré.
4. Realizado processamento de dados aplicando filtros de Amplitude, Limites, *Acrosstrack* e *Alongtrack* em configurações diferentes de acordo com as peculiaridades de cada área (KONGSBERG MARITIME, 2014a).
5. O *Feature Filter* só foi aplicado na Área 3, devido aos pilares da ponte.
6. Após isso, os dados foram exportados em GSF para serem inseridos no *CARIS HIPS&SIPS*, com os mesmos parâmetros usados no processamento do MBES.
7. Foi criado um novo arquivo de embarcação (*cehili_Geoswath1.vsf*), praticamente vazio, contendo apenas valores de TPU de acordo com os *offsets* e incertezas de cada equipamento retirados no site da CARIS (GENTILHOMME, 2016; SCHMIDT; JERRAM, 2015).
8. Realizado o *Merge*.
9. Realizado o TPU usando os mesmos parâmetros do MBES.
10. Os dados foram passados para o CARIS de forma a terem a mesma técnica e resolução de grade. Então, de forma análoga, foi criada uma superfície CUBE através da mesma metodologia citada no item anterior. Não foi realizado nenhum tipo de processamento nesse software (*Subset Editor* ou Filtros de Superfície).

3.5 PATCH TEST

O *patch test* foi realizado sem problemas e os *offsets* angulares estáticos puderam ser calculados. O software utilizado foi o *SIS*, versão 4.3.2 da Empresa *Kongsberg Maritime*. Um fato que facilitou foi o multifeixe ter sido calibrado uma semana antes, de modo que os valores encontrados durante o *patch test* foram nulos. Apesar de o MBES ser fixo no casco, foi realizado outro procedimento de calibração, pois como a gôndola da lancha é retrátil, os valores podem mudar. Contudo isso não foi observado. Para evitar qualquer mudança de ângulo, durante o período de realização de testes, a gôndola foi mantida arriada. Foram adotados os seguintes valores: Transmissor – 0,08° de *roll*, 2,75° de *pitch* e -0,5° de *yaw* e no Receptor – 0,06° de *roll*, 2,81° de *pitch* e -0,5° de *yaw*. O teste de latência foi nulo.

Já no *Geoswath 4R*, o procedimento de calibração foi feito no software *Geoswath Plus*, versão 1.0.21.14560 e foi realizado para ambos os bordos do sensor. Os valores encontrados foram: Bombordo – $0,34^\circ$ de *roll*, $-0,11^\circ$ de *pitch* e 0° de *yaw* e para Boreste – $0,23^\circ$ de *roll*, $-0,38^\circ$ de *pitch* e $0,1^\circ$ de *yaw*. O teste de latência foi de 0,017 s.

3.6 INTERPOLADORES DE SUPERFÍCIES

O software *CARIS HIPS&SIPS* oferece 4 tipos de interpoladores para a confecção de um modelo digital de terreno, que no caso, é a superfície batimétrica. São eles: *Swath Angle Surface*, *Shoalest True Position*, *Uncertainty Surface* e *CUBE (Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator) Surface* (CARIS, 2014).

O **primeiro método** se baseia na geometria do sensor. Ele considera três fatores na hora de confeccionar a grade:

- Variação do raio de influência – o raio de influência de cada informação de profundidade é calculado a partir da largura do feixe (aqui se fala do feixe singular, formado por cada canal individualmente) (Figura 44), da profundidade e o *grazing angle*.

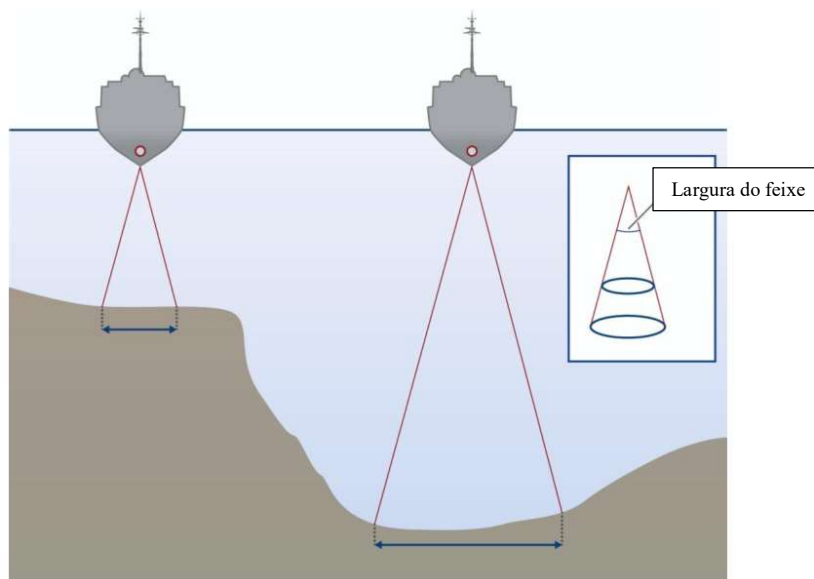


Figura 44 – Aumento da superfície ensonificada com o feixe de acordo com o aumento da profundidade, considerando a largura do feixe constante. Fonte: adaptado de CARIS (2014).

- Distância do nó – o peso de cada informação de profundidade decai com o aumento da distância ao nó (Figura 45).

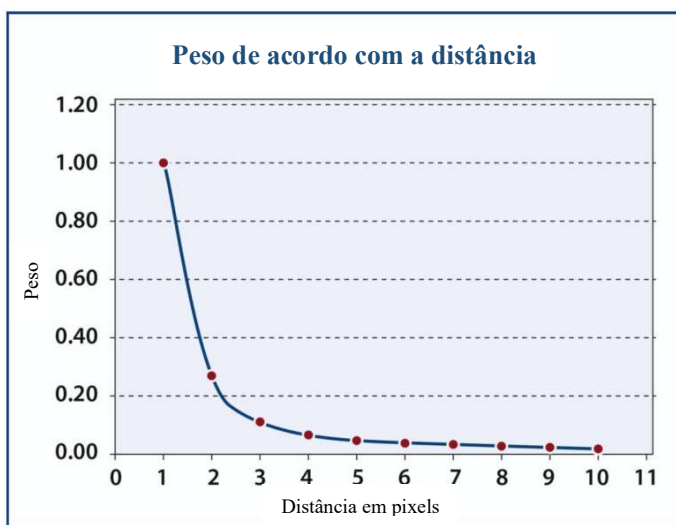


Figura 45 – Gráfico de peso x distância. A informação da profundidade terá diferentes pesos de acordo com a distância, em pixels, para cada nó. Fonte: adaptado de CARIS (2014).

- *Grazing angle* – o peso de cada informação de profundidade decai com a diminuição do *grazing angle*, diminuindo a influência dos feixes mais externos (Figura 46).

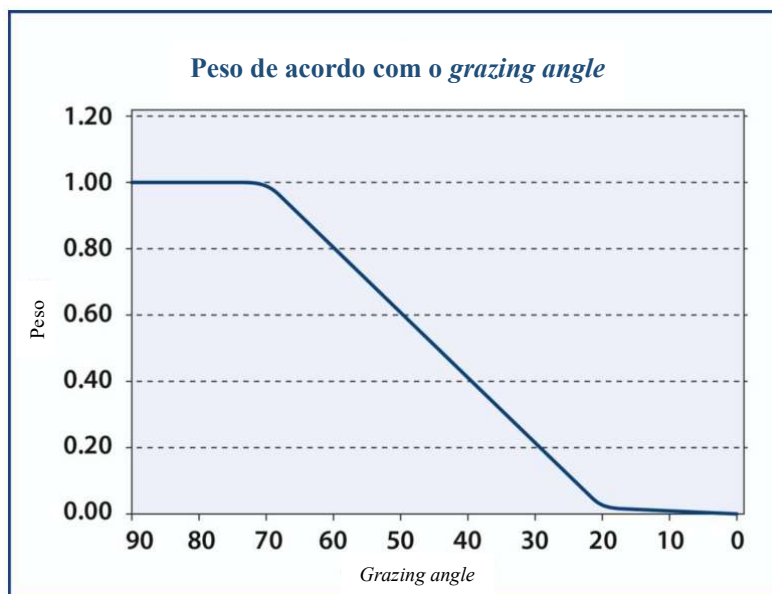


Figura 46 – Gráfico de peso x grazing angle. A informação da profundidade terá diferentes pesos de acordo com o grazing angle. Fonte: adaptado de CARIS (2014).

O **segundo método** considera que a profundidade representativa de cada nó será a mais rasa dentro de uma área escolhida (a área variará de acordo com a resolução da grade). A posição do nó, será a da profundidade mais rasa também (CARIS, 2014).

O **terceiro método** leva em consideração a incerteza propagada de posição (HzTPU) e a de profundidade (DpTPU). Neste algoritmo, quanto mais distante do centro do nó se situa a informação de profundidade (*ping*), maior também a incerteza da profundidade e menos ela influenciará o valor do nó. Por ocasião de sua execução, deve-se escolher qual a ordem da OHI se pretende atingir. Só serão consideradas as profundidades cuja incerteza não ultrapasse o valor preconizado pela S-44 para a ordem escolhida. Tal opção também exercerá influência no raio de ação da profundidade. Quanto maior for a precisão requerida, menor será o raio de ação (CARIS, 2014).

O **quarto e último método** tem um critério de peso semelhante ao anterior, com o raio de ação de cada informação de profundidade variando de acordo com a ordem do levantamento escolhida e com a incerteza de cada profundidade aumentando conforme se afasta de sua posição real (Figura 47 e Figura 48). A diferença é que em vez de uma única informação, cada nó terá uma ou mais hipóteses plausíveis para serem as profundidades representativas de cada nó (CARIS, 2014). A Figura 47 mostra a incerteza da profundidade aumentado de acordo com a distância de sua posição inicial. O pequeno círculo amarelo indica a posição (visão planimétrica) e a profundidade (visão de perfil) da informação da profundidade, representando um *ping*. O quadrado coral indica a posição e profundidade do nó. O círculo azul indica o raio de influência do *ping* quando em Ordem Especial, enquanto que o círculo coral indica o raio de influência do *ping* na Ordem 1a. Conforme o nó se distancia do *ping*, maior será a incerteza que será contabilizada para esta profundidade quando esta for incluída na hipótese. Tanto o raio de influência de cada *ping* como sua incerteza aumentada são calculadas com um algoritmo próprio do CUBE, tendo como base o TPU.

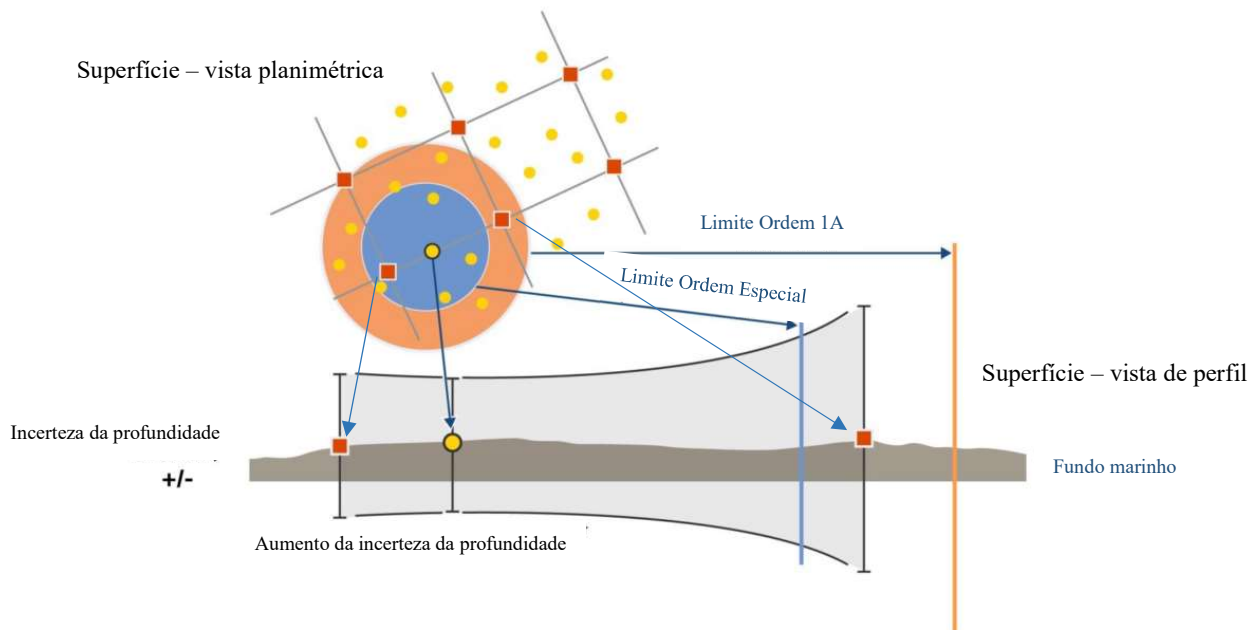


Figura 47 – Incerteza da profundidade aumentado de acordo com a distância de sua posição inicial. Fonte: adaptado de CARIS (2014). Quando a incerteza de um ping (representada pelo traço preto vertical) ultrapassa a tolerância (representada pelos traços verticais azul e coral) de uma determinada ordem escolhida, ele não é contabilizado para o nó.

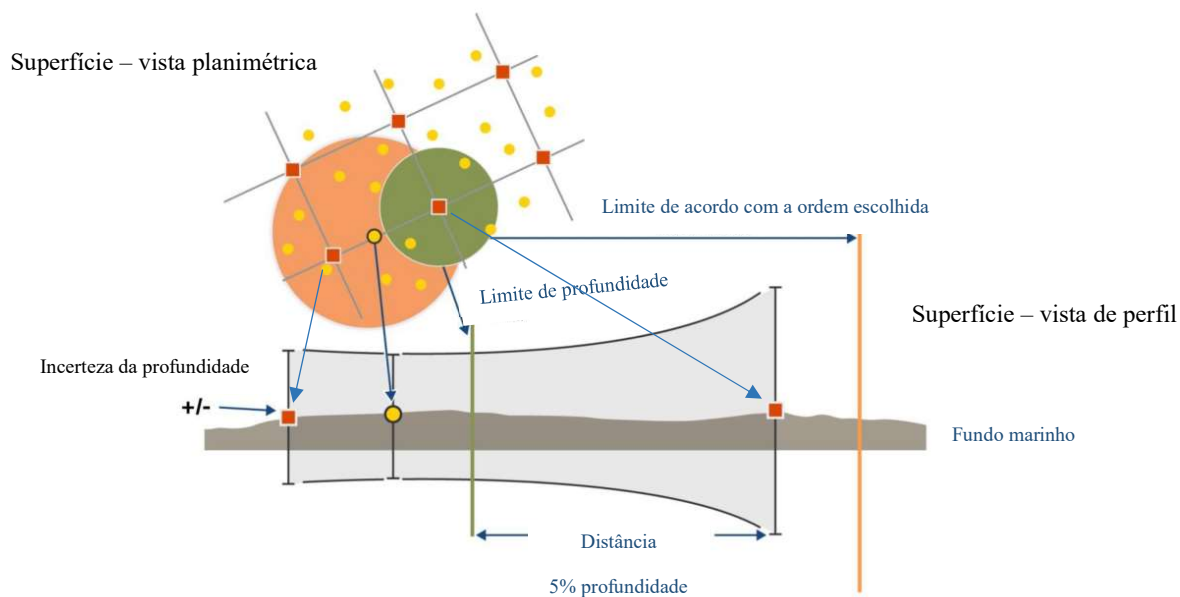


Figura 48 – A mesma informação da figura anterior, com o adendo de que o nó para de contabilizar pings que ultrapassem a distância de 5% da profundidade, mesmo que estejam dentro do limite da ordem escolhida. Fonte: adaptado de CARIS (2014).

As hipóteses são calculadas conforme as informações de profundidade oriundas de cada ping vão sendo computadas. Estas são ordenadas de forma aleatória e passam a ser registradas

em uma sequência denominada *pseudo-time* (CALDER; MAYER, 2003). Quando uma hipótese é formada e outra informação de profundidade chega, esta última é verificada para ver se pode ser englobada pela hipótese. O critério é que esta esteja dentro de 4 vezes o desvio padrão da hipótese. Caso esteja, ela é agregada à hipótese, podendo mudá-la ou mantê-la. Caso exceda essa tolerância, é criada outra hipótese e o nó passa a ter mais de um valor possível (CALDER; MAYER, 2003) (Figura 49). Essa mesma cinemática é repetida até se esgotarem os *pings* que têm raio de ação sobre o nó. O algoritmo calcula ainda a incerteza de cada hipótese, sendo que quanto mais dados agregam valor a uma hipótese, menor será sua incerteza (CARIS, 2014).

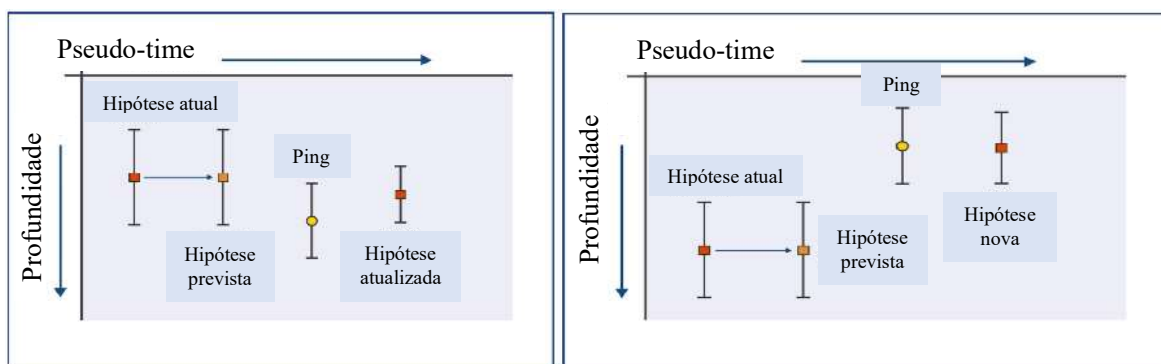


Figura 49 – Cálculo de hipóteses de acordo com o pseudo-time. No primeiro quadro, com a contabilidade de um novo ping (círculo amarelo) a hipótese (quadrados vermelhos e laranja) é atualizada. No segundo quadro, a informação de profundidade do ping excede o limite para ser inserido na hipótese atual, então outra é criada ou atualizada. Fonte: adaptado de CARIS (2014).

Após o cálculo das hipóteses, alguns nós terão mais de um valor possível. Para resolver tal fato, o CUBE utiliza três métodos para resolução de tais ambiguidades (CARIS, 2014) (Figura 50):

- Densidade – é escolhida a hipótese que tiver mais profundidades envolvidas no seu cálculo.
- Localidade – é escolhida a hipótese cujo valor mais se aproxima da média de profundidade dos nós vizinhos (desde que os “valores de força²²” (*strength value*) dos

²² Valor de força é usado para descrever quão matematicamente confiante o algoritmo do CUBE está de que a hipótese correta foi escolhida como representativa do nó. Quanto menor seu valor, melhor (CARIS, 2014). Esse valor varia de 0 (alta confiança) à 5 (baixa confiança). Nós com apenas 1 hipótese, por exemplo, têm como valor de força 0. Conforme vão aumentando o número de hipóteses possíveis, o valor de força do nó vai diminuindo (CARIS, 2017).

nós vizinhos não ultrapassem o máximo padrão ou definido. Caso excedam esse valor, não serão utilizados para compor a média).

- Densidade e localidade – é uma combinação de ambos. Existe para resolver o problema de locais em que a quantidade de informações de ruído possa ultrapassar as informações confiáveis. Nesse critério, é utilizado primeiramente o quesito densidade. Caso a hipótese escolhida por este critério tenha um valor de força além do permitido, o quesito de densidade é preterido pelo de localidade. Este foi o critério adotado pelo presente trabalho na construção das superfícies CUBE.

A Figura 50 mostra como esta dinâmica ocorre. O primeiro quadro trás o critério “densidade”, no qual, é escolhida a hipótese (em verde) com maior quantidade de valores, aqui representado pelo número 9. O segundo quadro demonstra o critério de “localidade”, sendo escolhida uma hipótese que mais se aproxima do valor da média de profundidades dos nós vizinhos (desde que tenham um valor de força menor que o limite estabelecido). O terceiro quadro mostra o critério “densidade e localidade”. Nele, a hipótese escolhida pelo critério de densidade foi a representada pelo número 5 (quantidade de *pings* que contribuíram para esta hipótese). Caso esta hipótese tivesse um valor de força maior do que o permitido, a hipótese escolhida seria a outra (CARIS, 2014; QPS, 2018).

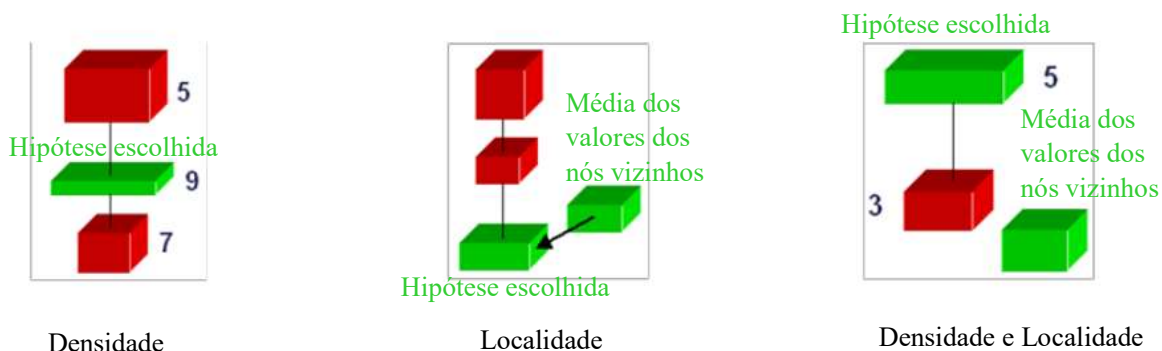


Figura 50 – Métodos de desambiguidade do CUBE. Fonte: adaptado de CARIS (2014).

Cada um desses métodos cria várias camadas dentro da mesma superfície. As que foram utilizadas neste trabalho ou que têm importância para sua compreensão são (CARIS, 2014):

- *Density* – na superfície CUBE é a camada que representa a quantidade de *pings* que contribuíram para a hipótese escolhida. Na superfície *Swath Angle* é a camada que contém a quantidade de *pings* que contribuíram para cada nó.

- *Depth* – camada representativa da profundidade calculada. No caso da superfície CUBE, é a camada que representa a hipótese escolhida.
- *Node Standard Deviation* – camada que contém o desvio padrão de todas as profundidades que contribuíram para todas as hipóteses do nó. Contribuem para este cálculo todas as profundidades que foram dadas como aceitas durante o processamento (só existe na superfície CUBE).
- *Shoal* – as profundidades mais rasas de um nó.
- *Standard Deviation* – na superfície CUBE, representa o desvio padrão de todas as profundidades que contribuíram para a hipótese escolhida (não foi utilizada). Na superfície *Swath Angle* representa o desvio padrão de todas as profundidades que contribuíram para o nó. É equivalente à camada *Node Standard Deviation*.
- *Uncertainty* – só existe na superfície CUBE. Representa a incerteza calculada da hipótese escolhida.

3.7 CONTROLE DE QUALIDADE

Faz-se necessário ter um controle de qualidade para saber se o dado adquirido tem sua incerteza dentro do preconizado para as ordens parametrizadas pela OHI. Para isso, faz-se mister o entendimento de alguns conceitos (OHI, 2008):

- Acurácia – extensão que uma grandeza medida está dentro do valor presumido ou tido como correto.
- Precisão – quanto o valor desvia do valor tido como presumido ou correto. Quanto mais precisa uma medição, menor será a variabilidade entre os valores obtidos.
- Erro – diferença entre um valor computado ou observado de uma grandeza e seu valor real. Como não se pode saber o valor real de uma grandeza, o erro também não pode ser calculado com precisão, apenas estimado. Nesse estudo não será usado o vocábulo erro e sim incerteza para valorar a estimativa do erro.
- Incerteza – intervalo sobre um valor que conterá o valor real de uma determinada grandeza, medida dentro de um nível de confiança e de uma distribuição específica. Aqui, incerteza e intervalo de confiança são equivalentes.
- Nível de confiança – “... probabilidade em que o valor real de uma medida será situado dentro da incerteza especificada do valor medido.” (OHI, 2008) Neste estudo será

considerado o nível de confiança de 95% e a distribuição será a Normal²³. Nesses termos, o nível de confiança será $1,96\sigma$ (1,96 vezes o desvio padrão). Isso quer dizer que o valor real de uma grandeza estará dentro do intervalo $[-1,96\sigma; 1,96\sigma]$ dela mesma.

Assim, uma mensuração de determinada grandeza pode ter dois indicadores: precisão e acurácia. A precisão está relacionada com a dispersão dos dados e pode ser indicada através da incerteza da medida. A acurácia é o quanto esta medida está próxima do valor considerado real. Este trabalho vai realizar uma avaliação de precisão e acurácia de todas as superfícies (com exceção da área 5) que foram adquiridas pelo MBES e pelo PDBS. Não será medida a acurácia do MBES, haja vista que ela está sendo considerada como o valor padrão.

3.7.1 *Precisão*

A precisão será medida através de duas formas: a primeira será através da Incerteza Propagada Total (IPT) da hipótese do nó e a segunda por meio da incerteza amostral do nó.

A IPT da hipótese é a combinação da Incerteza Horizontal Total (IHT) e da Incerteza Vertical Total (IVT), sendo ambas calculadas por meio da Lei de Propagação de Incertezas (PEREIRA, 2016). A IPT combina a incerteza de várias fontes com outras que foram calculadas ou derivadas (PEREIRA, 2016). Dessa forma, a IPT é calculada no CARIS por meio da função “*Compute TPU* (do inglês *Total Propagated Uncertainty*)”, onde as incertezas estáticas são informadas por ocasião da construção do arquivo de embarcação (incertezas nominais dos equipamentos de posicionamento, sensores de movimento e medições de *offsets*) e os valores de incerteza da correção de maré e do perfil de velocidade do som são informados na hora de computar o TPU (CARIS, 2017).

A OHI preconiza as máximas IHT e IVT para cada ordem de levantamento, de modo que todas as medições de profundidade, para estar dentro de uma determinada ordem, devem ter tanto a IHT quanto a IVT dentro desta tolerância. Nesse ponto, a superfície CUBE é muito útil, pois a partir do momento que lhe é informada qual ordem ela deve atender, serão consideradas apenas, por ocasião de sua produção, as profundidades que atendam a esse requisito (CARIS, 2017). De forma análoga, a incerteza da hipótese também é calculada (CARIS, 2014) de modo que cada uma terá uma IPT associada. Assim, uma forma de controle de qualidade é assegurar que a incerteza vertical da hipótese não ultrapasse o preconizado pelo

²³ Em sondagem, se tratam os dados provenientes dos sonares como tendo distribuição Normal.

OHI. Tal procedimento pode ser realizado através das seguintes equações (para Ordem Especial (Eq. 3) e 1a (Eq. 4) respectivamente):

$$\begin{aligned} & \text{Resíduo da incerteza vertical da hipótese (Ordem Especial)} \\ & = \text{Incerteza da hipótese} - \sqrt[2]{0,25^2 + (0,0075 \times \text{profundidade})^2} \leq 0 \quad (\text{Eq. 3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Resíduo da incerteza vertical da hipótese (Ordem 1a)} \\ & = \text{Incerteza da hipótese} - \sqrt[2]{0,5^2 + (0,013 \times \text{profundidade})^2} \leq 0 \quad (\text{Eq. 4}) \end{aligned}$$

Caso os valores resultantes das equações sejam negativos, significa que a IVT do nó está dentro do preconizado para determinada ordem. O ideal é que todos os nós tenham incerteza dentro da tolerância da ordem requerida.

A segunda forma de avaliação da precisão é por meio da incerteza amostral do nó. Esta é representada pelo desvio padrão de todas as informações de profundidade que estão contidas dentro de um nó (PEREIRA, 2016), ou seja, é a dispersão dos dados. É importante que a dispersão esteja dentro do intervalo preconizado para a ordem escolhida. Assim, será considerado como nível de confiança $1,96\sigma$ (95%), considerando distribuição normal. Na prática, seriam os valores das camadas *Node Standard Deviation* (superfície CUBE) e *Standard Deviation* (superfície *Swath Angle*) (os valores de cada camada já são produzidos levando em consideração o nível de confiança de 95%, ou seja, seus valores já foram multiplicados por 1,96). Dessa forma, para um nó ser considerado como sendo de Ordem Especial (Eq. 5) ou 1a (Eq. 6), deve satisfazer as seguintes equações:

$$\text{Resíduo da incerteza amostral} = 1,96 \times \sigma - \sqrt[2]{0,25^2 + (0,0075 \times \text{profundidade})^2} \leq 0 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{Resíduo da incerteza amostral} = 1,96 \times \sigma - \sqrt[2]{0,5^2 + (0,013 \times \text{profundidade})^2} \leq 0 \quad (\text{Eq. 6})$$

Na construção de uma superfície de grade regular, a resolução é um tópico importante a ser discutido. A resolução mais grosseira adotada pelo CHM para o controle de qualidade é 0,5 metros. Isso se deve ao critério de *Nyquist*, no qual para uma feição ser observada, deve pelo menos ter duas amostras que a detectaram (ALLABY, 2008). Assim, para a detecção de

uma feição de 1 metro (ordem especial), é recomendável que as amostragens de profundidade sejam feitas em espaçamentos de 0,5 metro.

Porém, em uma superfície muito irregular, nem todos os nós atingem o nível de confiança pretendido. Baseado nisso, para uma superfície batimétrica ser considerada dentro da ordem Especial ou 1a, 95% de todos seus nós devem satisfazer as equações acima.

Dessa forma, pode-se observar a diferença entre as duas formas em que a incerteza será analisada e como ambas diferem entre si. Enquanto uma leva em consideração as incertezas que deram origem às informações de profundidade, a outra se baseia na coerência do resultado.

3.7.2 *Acurácia*

A acurácia será avaliada de três formas: observando a dispersão dos dados MBES com relação à superfície do PDBS, por meio do cálculo de superfícies representativas da diferença de profundidades e cálculo das superfícies representativas da diferença das informações de profundidade mais rasas²⁴.

A dispersão dos dados multifeixe frente a superfície gerada pelo interferométrico é feita por meio da ferramenta “*QC Report*”²⁵ do software *CARIS HIPS&SIPS*. Nela, o programa verifica as estatísticas de algumas linhas consideradas como padrão (linhas multifeixe) com relação a uma superfície que será avaliada (superfície do interferométrico). Assim, são calculadas virtualmente duas superfícies paralelas à superfície de referência, distanciadas o valor máximo permitido pela OHI. Depois é verificado a porcentagem dos *pings* de cada linha que está dentro deste intervalo. Quando esta porcentagem é maior ou igual a 95%, a superfície pode ser considerada representativa da ordem que foi avaliada (PEREIRA, 2016).

A superfície diferença é calculada a partir da subtração entre os valores da camada *Depth* da superfície formada pelas linhas MBES e a da camada *Depth* formada pelas linhas PDBS ($Depth_{MBES} - Depth_{PDBS}$). Tal procedimento gera uma superfície que contém a diferença dos valores alcançados por cada uma. Com ela, não será computada nenhuma estatística, uma vez

²⁴ Essa informação é vital para a atualização de documentos náuticos, visto que sempre constam neles as profundidades mais rasas encontradas.

²⁵ Os parâmetros do *QC Report* foram: *reference surface – Depth, selectic stactics – S44, available – Special Order e Order 1a, selecting group method – by angle, define ranges – minimum: -60, maximum: 60, in steps of: 1*. Isso significa que a camada que serviu de comparação foi a *Depth*, as estatísticas utilizadas foram as preconizadas pelas ordens Especial e 1a da S-44, que os feixes foram avaliados por ângulos, de 60 graus de um bordo até 60 graus do outro, sendo a análise feita a cada grau.

que tal campo será explorado pelo procedimento anterior, contudo fornecerá uma análise qualitativa de comparação.

O cálculo de diferença das informações mais rasas é muito útil para os serviços hidrográficos. Para resguardar a segurança da navegação, a camada da superfície que é utilizada para a criação da carta náutica é a camada *Shoal*, que contém as informações de profundidade mais rasas encontradas em cada nó. Apesar de não ser o mais exato quando se trata da detecção do fundo marinho, se garante que não haverá obstáculos mais rasos do que os reportados durante o processamento dos dados. Assim, uma avaliação de tal camada não só verifica a detecção e dispersão dos dados, mas também o seu potencial uso pela DHN.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ÁREA 1 – TESTE DE DETECÇÃO DE ALVOS

O resultado do levantamento batimétrico na área 1 está sendo expresso através das superfícies batimétricas (Figura 51). A Tabela 9 resume os principais dados.

Tabela 9 – Dados informativos da área 1 (azul), relativos à precisão (rosa) e relativos à acurácia (coral).

Parâmetros	Kongsberg EM 2040	Hydroacoustic Geoswath 4R
Comprimento (dimensão considerada no sentido das linhas) (~m)	700	700
Largura (dimensão considerada no sentido transversal às linhas) (~m)	400	420
Área sondada (~km ²)	0,28	0,3
Quantidade de linhas	12	12
Distância entre linhas (~m)	30	30
Direção das linhas (~°)	000 - 180	000 - 180
Velocidade de sondagem (m/s)	2,8	2,8
Resolução da superfície (m)	0,5	0,5
Quantidade de células	1.229.908	1.356.961
Incerteza média da hipótese (m)	0,1	0,2
Inclusão Ordem Especial – Eq. 3	100% dos nós	100% dos nós
Desvio padrão médio do nó (m)	0	0,2
Inclusão Ordem Especial (baseado na incerteza amostral do nó – Eq. 5)	99,5% dos nós	36,8% dos nós
Densidade (média da quantidade de pings que contribuíram para 1 nó)	51,5	227,6
QC Report		Ordem Especial
Depth_{MBES} - Depth_{PDBS}		$\mu = 0,1$ m, MÍN = -3,4 m e MAX = 3,8 m
Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}		$\mu = 0,6$ m, MÍN = -2,7 m e MAX = 4,0 m

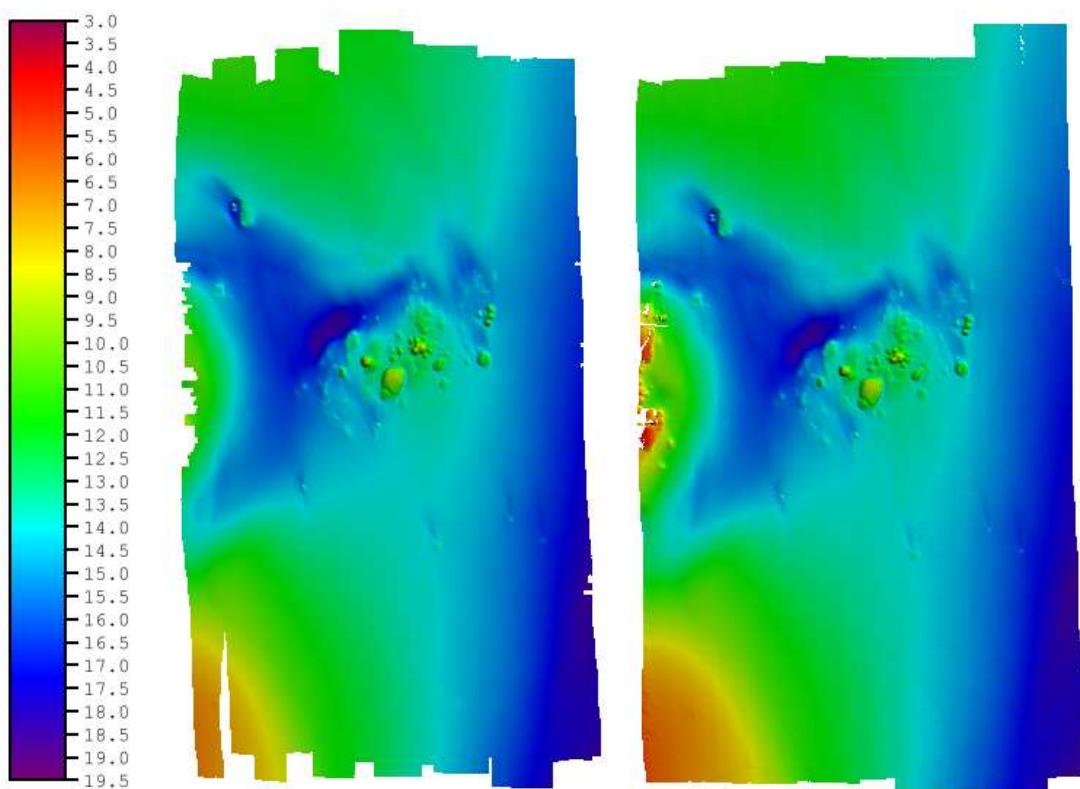


Figura 51 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade (camada Depth). A superfície da esquerda foi criada a partir da sondagem com o MBES e a da direita com o PDBS. Escala em metros.

4.1.1 Precisão

Na superfície gerada a partir dos dados adquiridos com o MBES, a incerteza média (aproximada na ordem do décimo de metro, e isto valerá para todas as áreas) da hipótese foi de 0,1 m e o desvio padrão médio (aproximado na ordem do décimo de metro, e isto valerá para todas as áreas) do nó foi de 0 m, em 1.229.908 células analisadas e uma média de 51,5 *pings* contribuíram para cada nó. Após o cálculo da equação 3 (incerteza da hipótese), verificou-se que os valores de todas as células deram negativos. Com o cálculo da equação 5 (incerteza do nó), foi visto que 99,5%²⁶ das células analisados foram negativas. Assim, por ambos os critérios considerados, a sondagem atingiu Ordem Especial.

Na superfície gerada com os dados advindos do PDBS, a incerteza média (aproximada na ordem de décimo do metro, e isto valerá para todas as áreas) da hipótese foi de 0,2 m e o

²⁶ O software CARIS HIPS&SIPS não foi capaz de fornecer esta estatística. Para tal, foi criada uma rotina em R que pudesse satisfazer o intento.

desvio padrão médio (aproximada na ordem de décimo do metro, e isto valerá para todas as áreas) do nó foi de 0,2 m, em 1.356.961 células analisadas e uma média de 227,6 *pings* em cada nó. O resultado da equação 3 foi 100% negativo. Por sua vez, o da equação 5 foi de 36,8% de nós considerados negativos.

Tais resultados indicam que, pela análise da incerteza da hipótese, ambos os sensores alcançaram ordem especial, mostrando que as incertezas propagadas estão dentro do preconizado. É curioso ver que mesmo com sensores diferentes, a incerteza foi muito semelhante para ambos. Tal fato se explica porque as maiores contribuições para a IVT vieram das incertezas das medições do calado (*draft*) e da estimativa de mudança de calado devido ao consumo de combustível (*loading*)²⁷ (Figura 52). O que justifica um aumento da incerteza do PDBS é a contribuição do *heave*. A pergunta que surge é por que a contribuição do *heave* para o PDBS é maior do que para o MBES, visto que foi utilizada a mesma lancha. Isto pode ser explicado pelo fato de o modelo de propagação vertical de erros de cada sensor ser diferente, pois a matemática envolvida na propagação de erros de um sensor não é necessariamente igual ao do outro. Assim, uma determinada grandeza que contribui muito para um equipamento, não contribui necessariamente tanto para o outro. Pode-se explicar também tal discrepância pela incerteza de cada equipamento utilizado na medição do *heave*. Enquanto a do multifeixe foi de 0,02 m, a do interferométrico foi de 0,05 m (ambos os dados inseridos no arquivo de embarcação do CARIS). Outro fator que afeta é o fato de os dados do interferométrico serem mais dispersos (ver-se-á a seguir), o que faz que a incerteza da hipótese também aumente. Deve-se levar ainda em consideração que os fatores acima discriminados podem atuar conjuntamente.

²⁷ Tais informações sobre a dinâmica da embarcação são obtidas por ocasião do recebimento da lancha quando comprada e são inseridas no arquivo de embarcação que é utilizado pelo *software CARIS HIPS&SISPS*. Estas foram informadas pelo próprio NPqHo Vital de Oliveira.

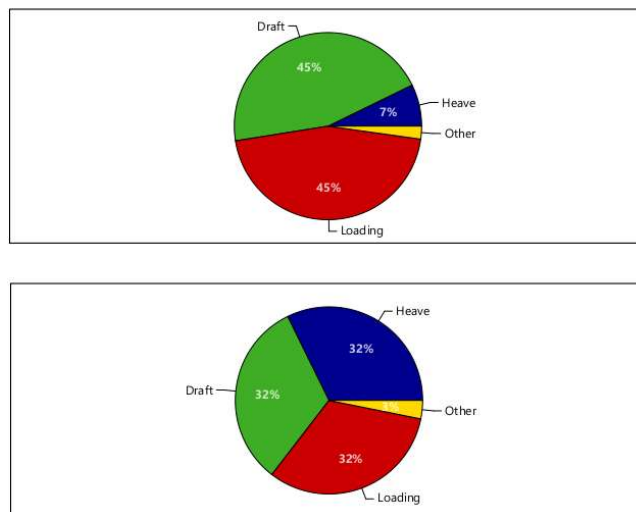


Figura 52 – Gráfico demonstrando as fontes de incerteza de cada sensor para a área 1. O gráfico de cima corresponde ao MBES, enquanto o de baixo ao PDBS.

Com relação à incerteza amostral do nó, a do multifeixe foi consideravelmente menor do que a do interferométrico. Tais números indicam que os dados oriundos do multifeixe têm uma coerência maior, ou seja, uma dispersão menor dos dados considerados válidos durante o processamento. O mesmo fenômeno pode ser visto por meio da ferramenta *subset editor* do CARIS, onde mostra como os *pings* estão dispostos verticalmente (Figura 53 à Figura 56).

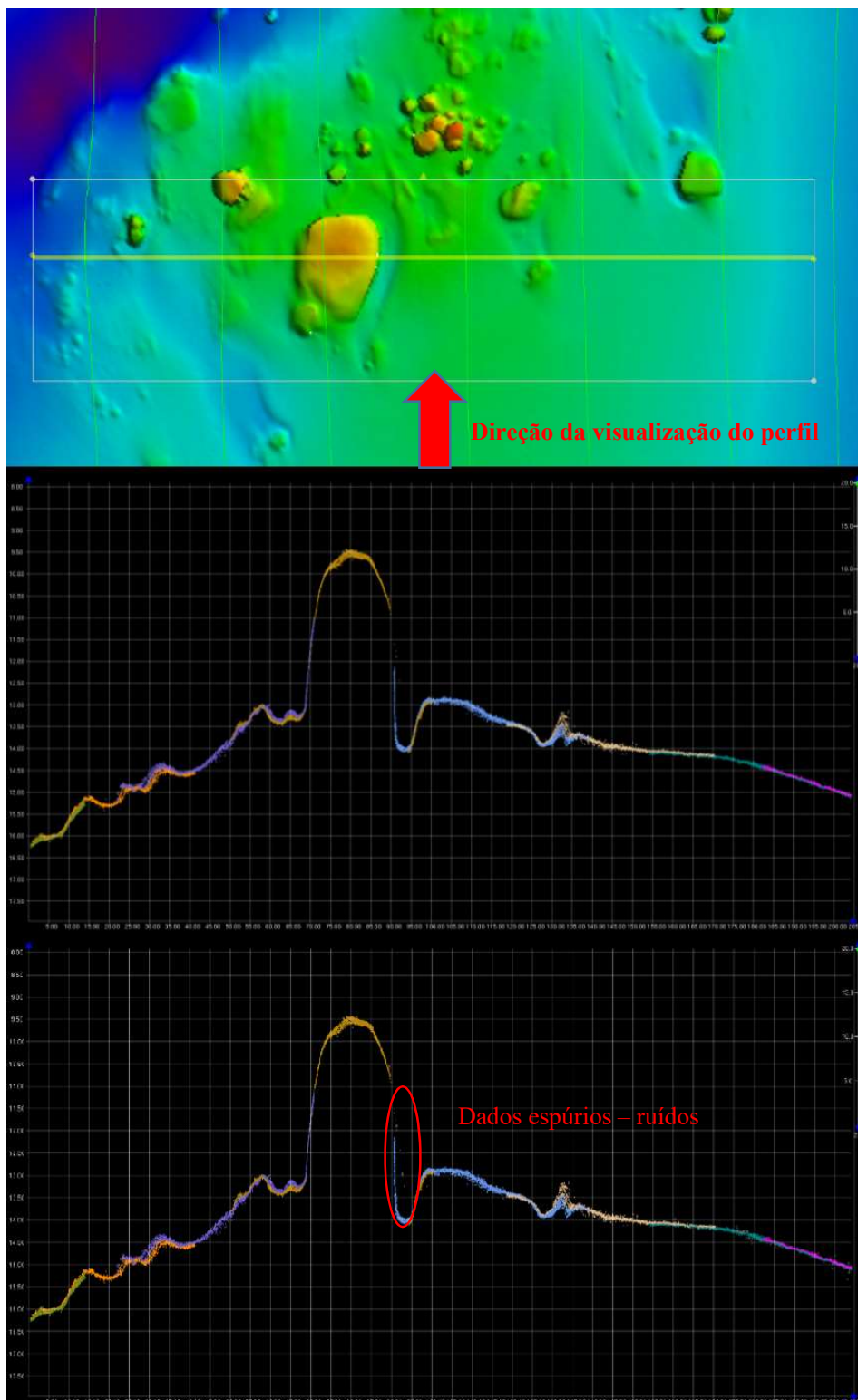


Figura 53 – Imagens do subset editor para a sondagem multifeixe. O primeiro quadro é o setor em que foi realizado o perfil. O perfil visualizado nos quadros abaixo está dentro da tarjeta amarela, que tem espessura de 1 m. A visão é de ré, o que significa que os dois últimos quadros mostram todos os pings dentro da faixa amarela como se o visualizador estivesse no ponto mais baixo da figura. As cores diferentes de cada perfil significam que pertencem a linhas de sondagens diferentes. O exagero vertical está em 20 vezes. O segundo

quadro mostra o perfil com os dados considerados válidos. O terceiro mostra com os dados rejeitados. Esta mesma diagramação será usada para todas as figuras do que contenham imagens do subset editor.

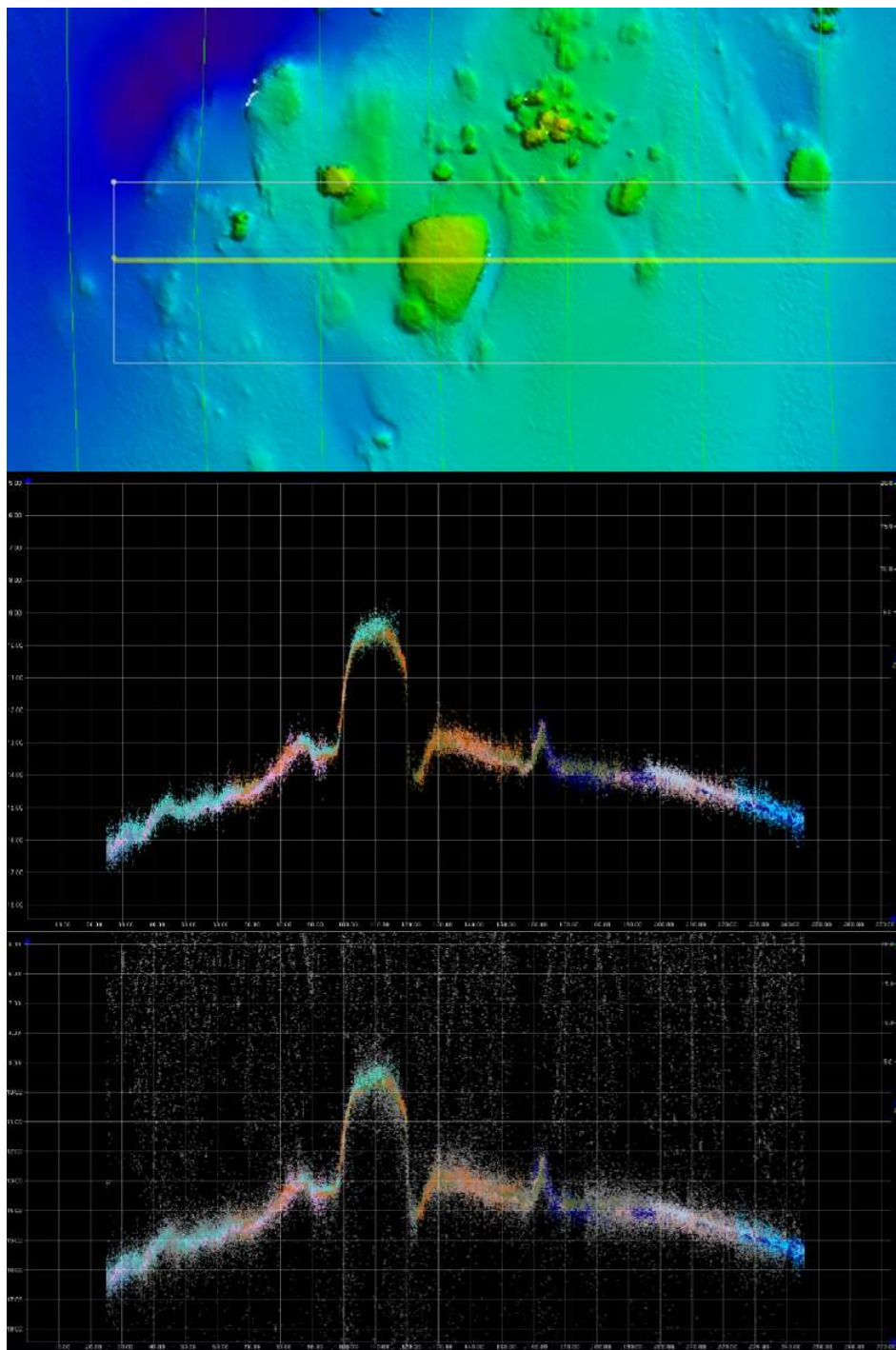


Figura 54 – Mesma disposição da figura anterior, só que para sondagem com o interferométrico. No terceiro quadro, os pings em cinza são dados espúrios.

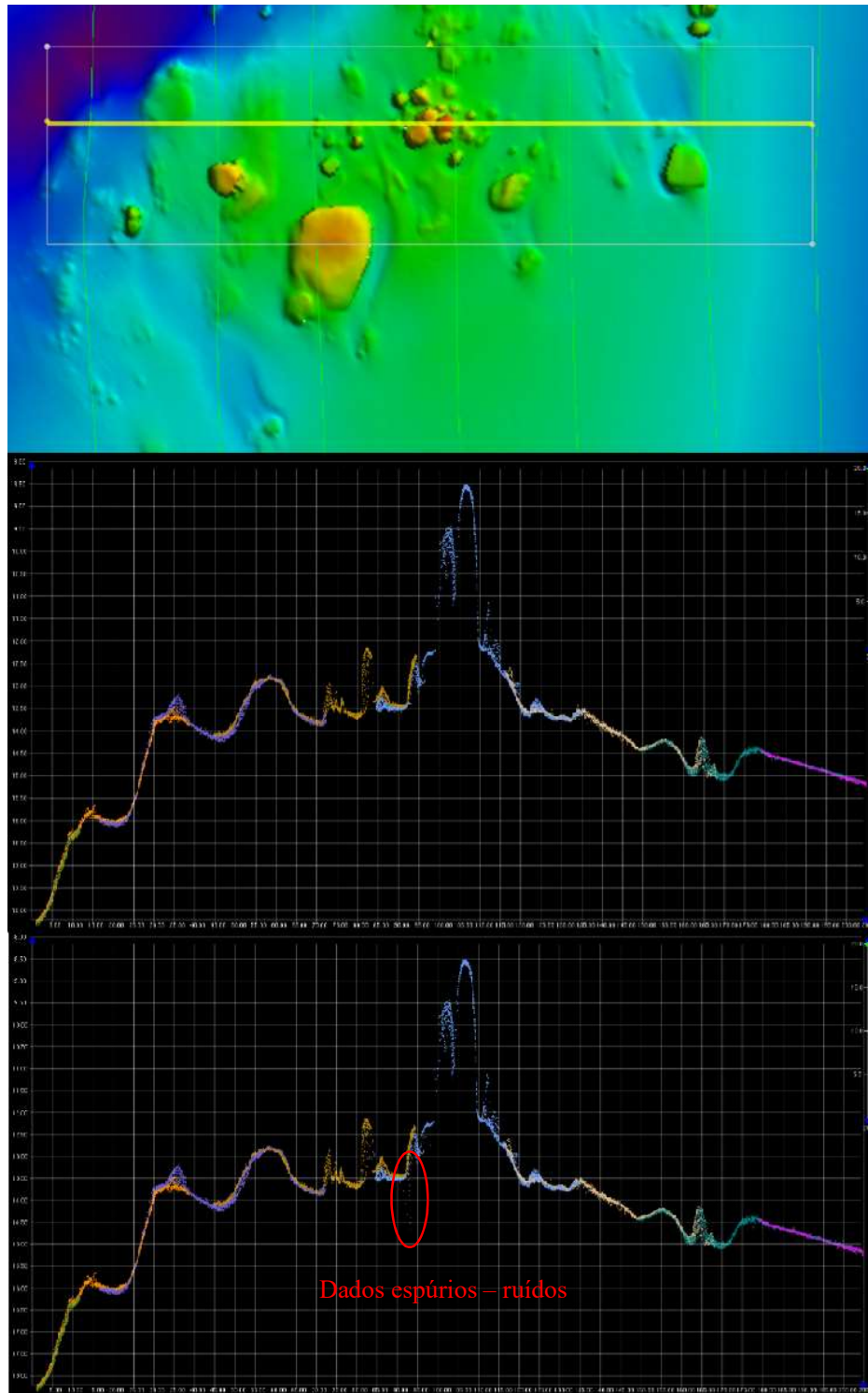


Figura 55 – Perfil com o subset editor na sondagem multifeixe. Outro setor.

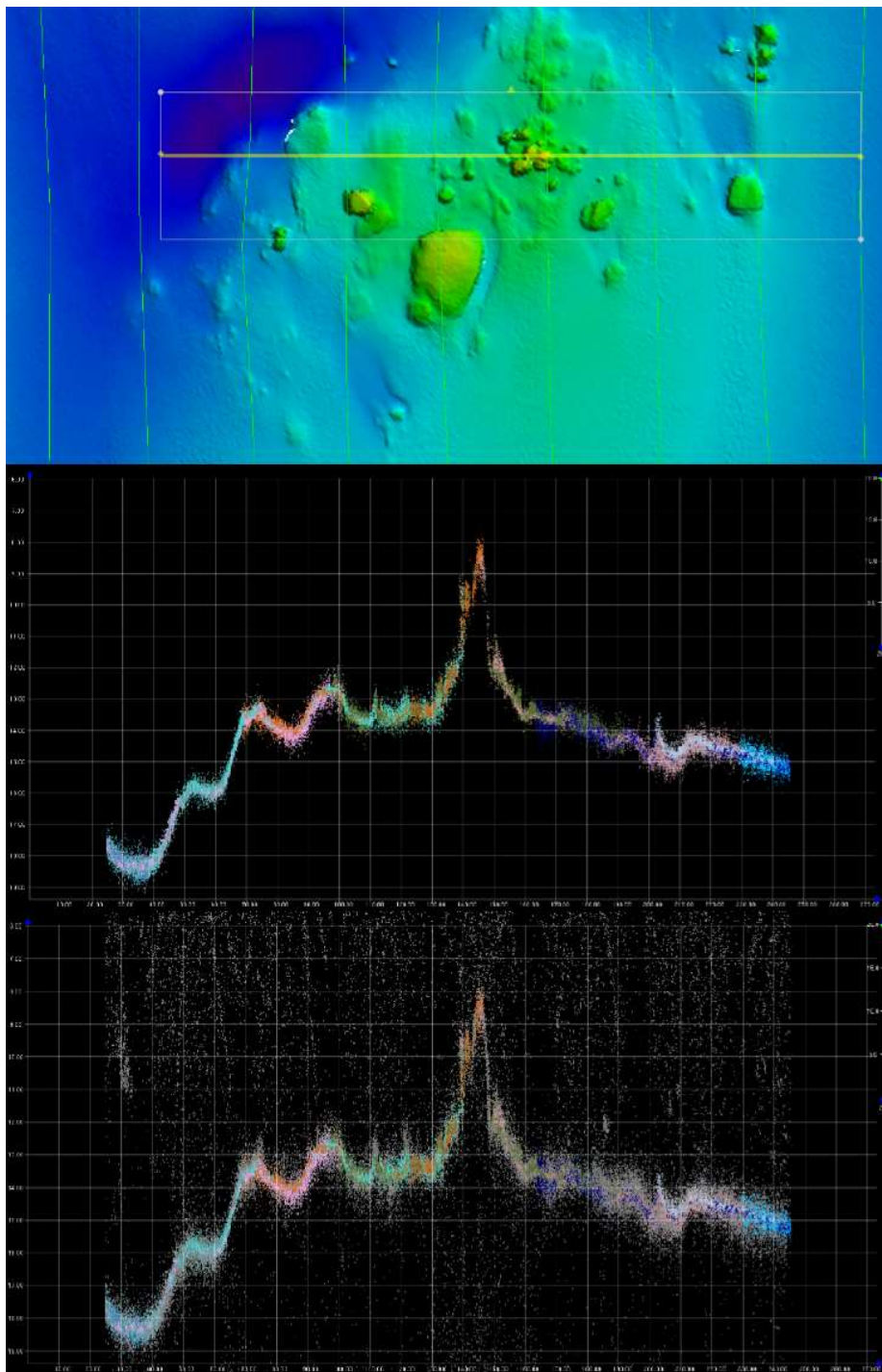


Figura 56 – Mesmo setor da figura anterior, sondagem com o interferométrico.

Por meio da análise visual da Figura 54 à Figura 56, é possível ver como, mesmo após o processamento, os dados do interferométrico são mais dispersos (menos coerentes do que no

multifeixe) e como os dados espúrios ou ruídos são presentes na sondagem com o PDBS, em uma quantidade muito maior do que na sondagem com o MBES.

Tal fato deriva do processamento estatístico do PDBS, pois este apresentou uma grande dificuldade em discernir dados válidos dos não válidos. Devido aos vários fenômenos aos quais o PDBS está sujeito e que foram apresentados no capítulo 2, principalmente ao excesso de ruído, é difícil dizer com a mesma facilidade do multifeixe quais dados podem ser considerados válidos ou não. Ocorre que o algoritmo e filtros aplicados não conseguiram definir o fundo e suas feições com a mesma precisão do MBES.

A Figura 57 apresenta duas camadas geradas a partir da superfície multifeixe. A da esquerda representa o resultado da equação 3 e a da direita da equação 5. Em verde estão os valores negativos (que estão dentro do intervalo preconizado para Ordem Especial), enquanto em vermelho os valores positivos. No teste que levou em consideração a incerteza das hipóteses, a camada ficou totalmente verde (esquerda). Na camada que levou em consideração a dispersão dos nós, como esperado, em ambientes mais íngremes, como borda das rochas, os valores da dispersão foram maiores. Isto se deve ao tamanho da célula analisada que foi de $0,25 \text{ m}^2$. Assim, dentro de uma área de $0,25 \text{ m}^2$, foi observada a dispersão dos valores tidos como válidos. Em ambientes muito inclinados, haverá valores válidos em diferentes profundidades dentro de uma mesma área, o que contribui para aumentar a dispersão.

Isto pode ser verificado pelo cálculo de uma superfície de resolução de $0,09 \text{ m}^2$ (Figura 58), no qual a porcentagem de ordem especial aumenta para 99,7%. Contudo, apesar de melhorar a resolução, diminui-se a robustez estatística (quantidade de informações que deram origem às informações estatísticas), o que pode ser avaliado pela diminuição dos números médios de *pings* em cada célula, de 51 para 18. Como já dito anteriormente, este trabalho utilizará para comparação a resolução de $0,5 \text{ m}^2$ (haverá um teste de resolução a ser analisado mais adiante), por razões já discriminadas. O mais importante é não avaliar o resultado do multifeixe e como melhorá-lo, mas sim em como o PDBS apresenta seus resultados à luz do MBES, uma vez que foram utilizados os mesmos parâmetros de processamento e comparação.

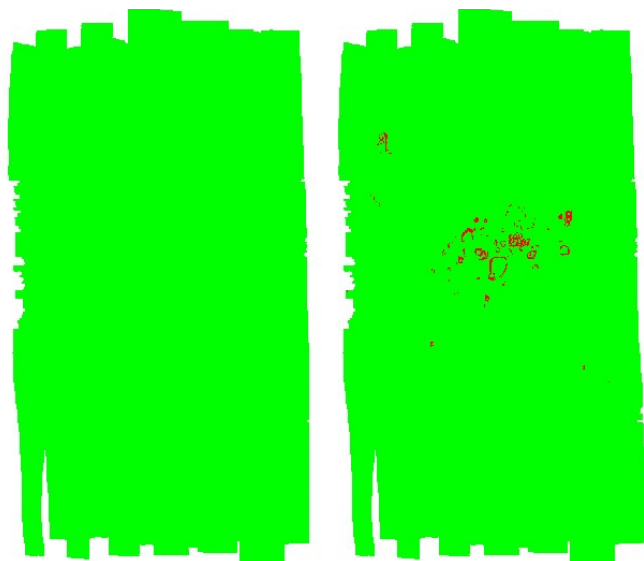


Figura 57 – Camadas de superfícies da área 1 criadas a partir das equações 3 e 5. A da esquerda é representativa da incerteza da hipótese. A da direita é representativa da incerteza amostral do nó. Ambas são relativas ao ecobatímetro multifeixe. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem Especial, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

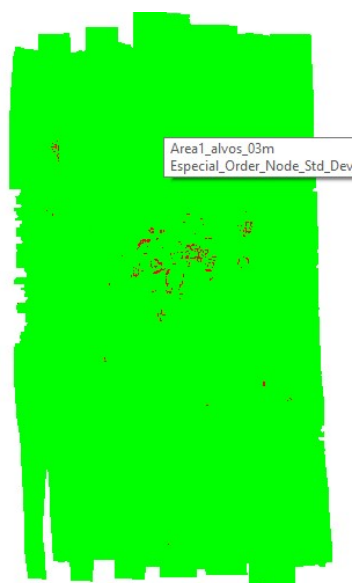


Figura 58 – Incerteza amostral do nó em uma superfície da área 1 de resolução de $0,3 \text{ m}^2$.

Por meio da Figura 59, pode-se visualizar a mesma metodologia sendo aplicada aos dados interferométricos. Enquanto a incerteza da hipótese ficou dentro do preconizado para ordem especial, a incerteza amostral do nó ficou abaixo, demonstrando a dispersão dos dados não só nas áreas com gradiente acentuado, mas também em áreas planas.

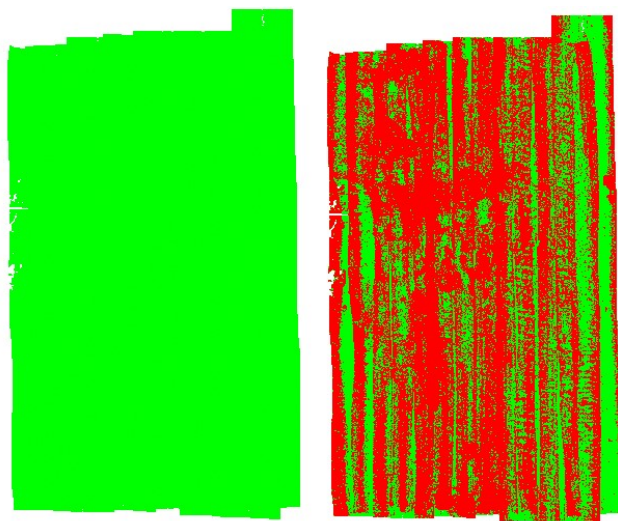


Figura 59 – Camadas de superfícies da área 1 criadas a partir das equações 3 e 5. A da esquerda é representativa da incerteza da hipótese. A da direita é representativa da incerteza amostral do nó. Ambas são relativas ao sonar de varredura lateral interferométrico. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem Especial, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

Contudo, quando se faz os mesmos testes para o intervalo da Ordem 1a, obtém-se que 98,8% dos nós se encaixam dentro do intervalo preconizado para essa ordem (Figura 60).

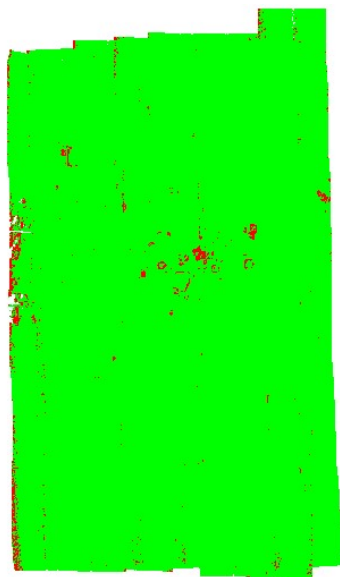


Figura 60 – Camada de superfície resultante da equação 6, mostrando que os resultados se enquadraram dentro da Ordem 1a.

4.1.2 *Acurácia*

O *QC Report* apresentou que todos os feixes ficaram acima de 95% para Ordem Especial. Foi calculada a superfície diferença da camada *Depth*, onde as profundidades representativas dos nós oriundas do interferométrico foram subtraídas das suas correlatas multifeixe. O resultado foi uma média de 0,1 m (indica que a superfície do interferométrico é, em média, 10 cm mais rasa do que a do multifeixe) com um mínimo de -3,4 m e um máximo de 3,8 m²⁸. Com a camada *Shoal*, a média foi de 0,6 m, com um mínimo de -2,7 m e um máximo de 4,0 m.

Os resultados indicam uma variação pequena das profundidades calculadas tanto pelo multifeixe quanto pelo interferométrico. O interferométrico, apesar de ter os dados mais dispersos, foi capaz de fornecer uma batimetria final (camada *Depth* através do algoritmo CUBE) muito semelhante à do multifeixe (Figura 61), estando, em média, apenas 10 cm mais raso.

Quando o mesmo procedimento é aplicado na camada *Shoal*, observa-se que a média aumenta para 0,6 m. Tal fato contribui para a segurança da navegação, pois fornece uma superfície em média mais rasa do que o constatado pelo multifeixe. Contudo, este resultado tem que ser visto com muita cautela, pois pode diminuir o calado operacional de um porto sem necessidade, o que acarretaria enorme prejuízo financeiro. Deve-se ainda levar em consideração que a camada *Shoal* é mais rasa devido à dispersão de dados ser maior no PDBS, o que representaria um resultado com uma tendência (*bias*).

Na análise da superfície diferença das camadas *Shoal*, as feições-alvos (rochas) contêm as maiores diferenças.

²⁸ Em uma profundidade de aproximadamente 13 metros, a variação de 3,4 m e 3,8 m representam entre 26% e 29% respectivamente. É uma variação muito grande, de fato, mas deve ser levado em consideração que estas estão ocorrendo nas bordas das rochas (será visto adiante) e que ocorrem devido à uma limitação física do equipamento, o que será melhor comentado no item 4.2.4, parágrafo 4.

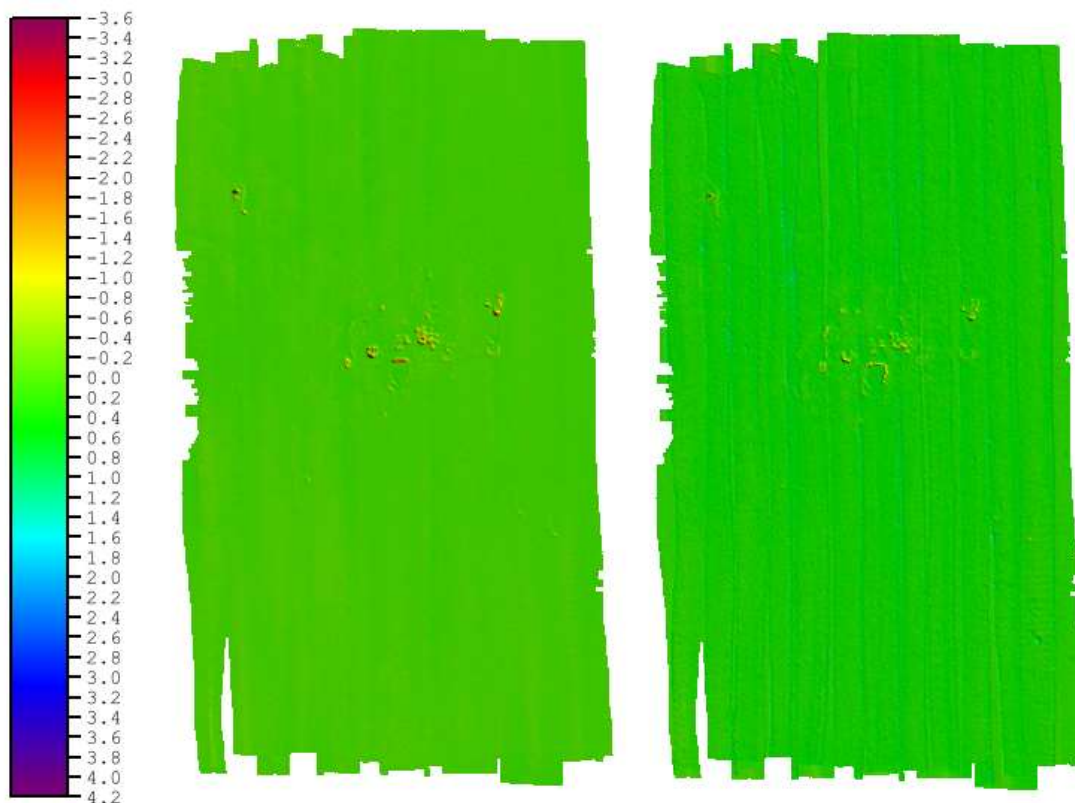


Figura 61 – Superfícies diferenças para a área 1. A da esquerda é a superfície diferença entre as camadas Depth do MBES e do PDBS. A da esquerda é o mesmo, porém para a camada Shoal. Escala em metros.

4.1.3 Análise de perfil de feições-avos – rochas

Como se pode ver pelas figuras abaixo²⁹ (Figura 62 à Figura 67), as áreas em que se localizam as rochas apresentam um perfil mais errático. Apesar das profundidades serem muito semelhantes, é visível a dispersão dos dados do interferométrico. Nas áreas planas, quase não se nota diferença.

Pode-se observar ainda, pelas superfícies diferenças ou pelas representativas de profundidade de cada equipamento (*Depth*), que a forma das rochas não fica muito bem definidas no interferométrico como no multifeixe. As maiores alterações diagnosticadas pela superfície diferença se situa exatamente na borda das rochas. Isto pode ser explicado pelo efeito de *layover*. Como essas áreas são muito íngremes, elas estão suscetíveis a sofrerem este efeito.

²⁹ Observar que os perfis que se seguirão neste trabalho foram feitos no próprio CARIS. Uma limitação do sistema é não apresentar a profundidade como sendo valores positivos. O que faz é apresentar no eixo Z, e como estão abaixo da superfície de referência (nível médio do mar), eles são lidos como valores negativos. Assim, as informações dos perfis das Superfície Diferença de Camada *Depth* (amarelo) e da Camada *Shoal* (lilás) estão espelhados. Eles devem ser considerados como valores positivos. Tal fato não vem alterar nem influenciar as comparações, uma vez que as superfícies diferenças serão comparadas de forma relativa entre elas mesmas.

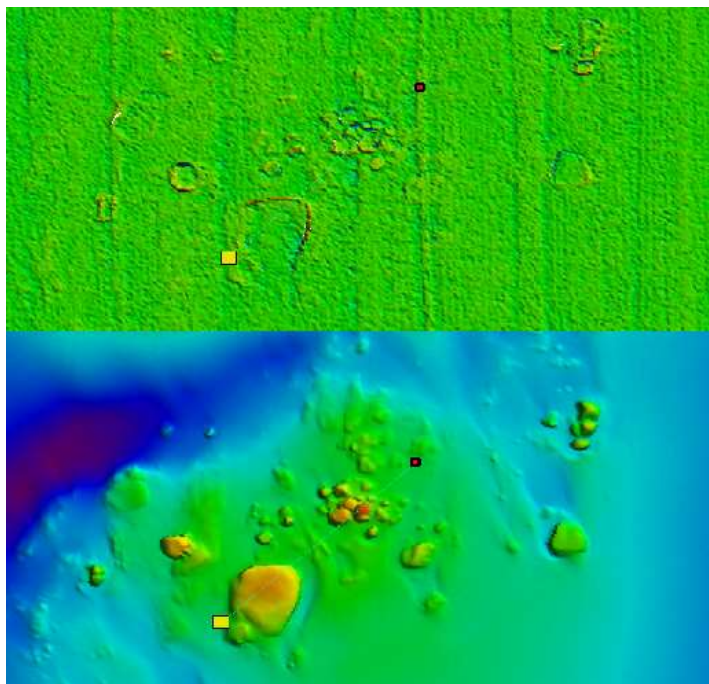


Figura 62 – Área do perfil 1. O quadro de cima é a Superfície Diferença das camadas Shoal, enquanto que o de baixo é a camada Depth da Superfície multifeixe. O quadrado amarelo representa o início do perfil e o vermelho o fim (orientação SW-NE). Tal configuração de quadros acompanhará todas as figuras.

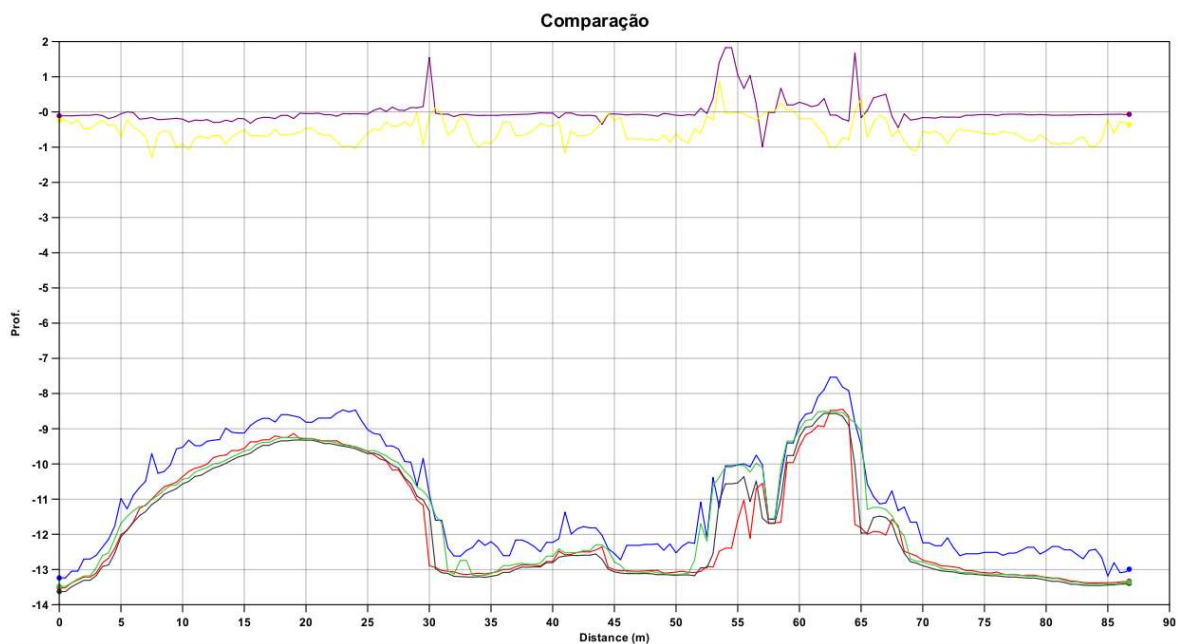


Figura 63 – Perfil 1 (orientação SW-NE). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

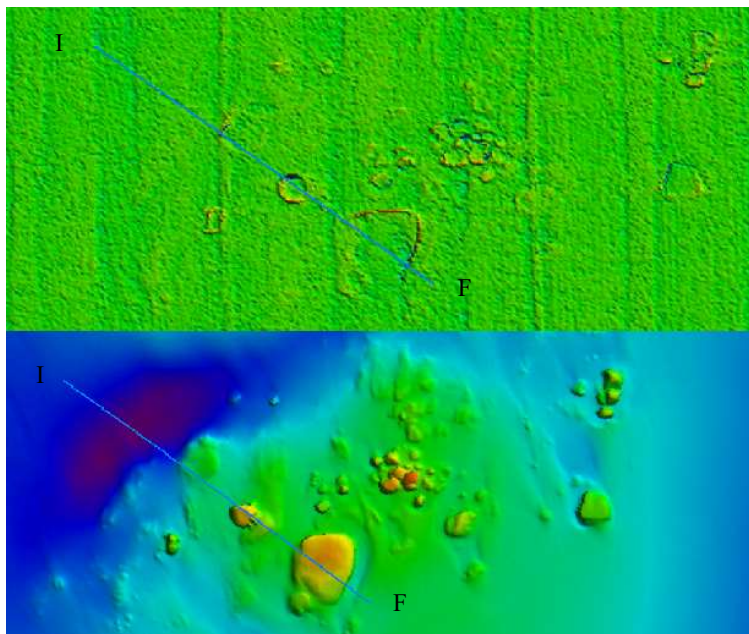


Figura 64 – Área do perfil 2. A letra “I” representa o início do perfil e a “F”, o fim (orientação NW-SE).

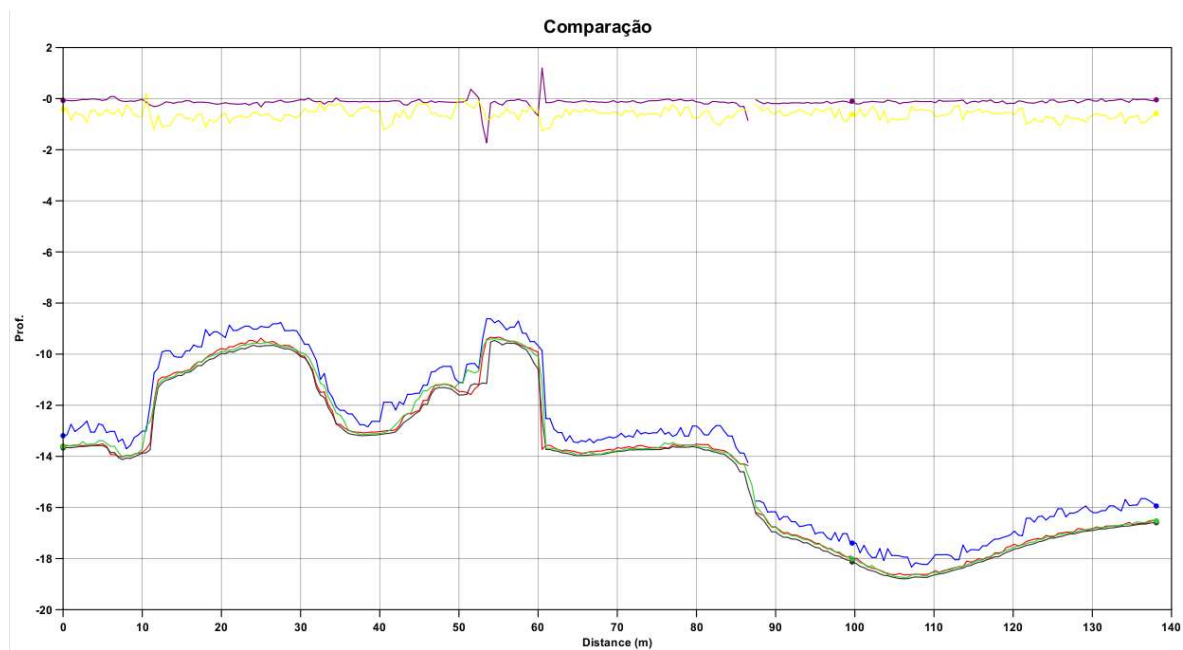


Figura 65 – Perfil 2 (orientação NW-SE). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

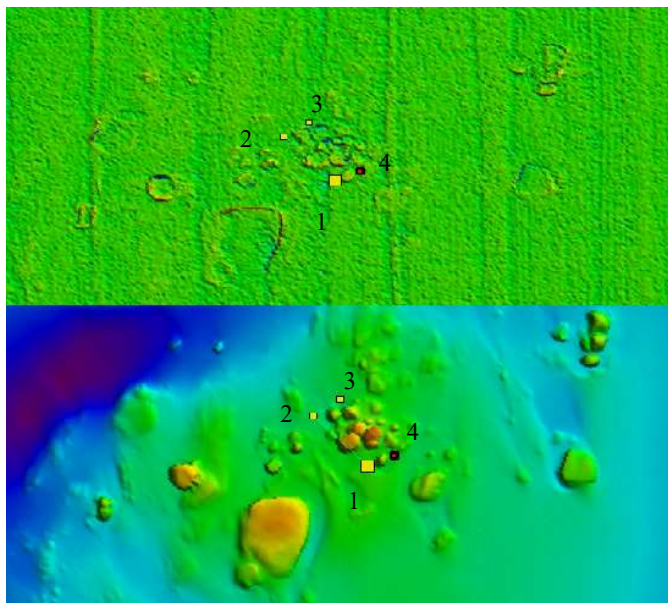


Figura 66 – Área perfil 3. Aqui, foi feito um perfil retangular representados pelos pontos 1, 2, 3 e 4. O ponto maior em amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação 1 à 2 – SE-NW, 2 à 3 – SW-NE e 3 à 4 – NW-SE).

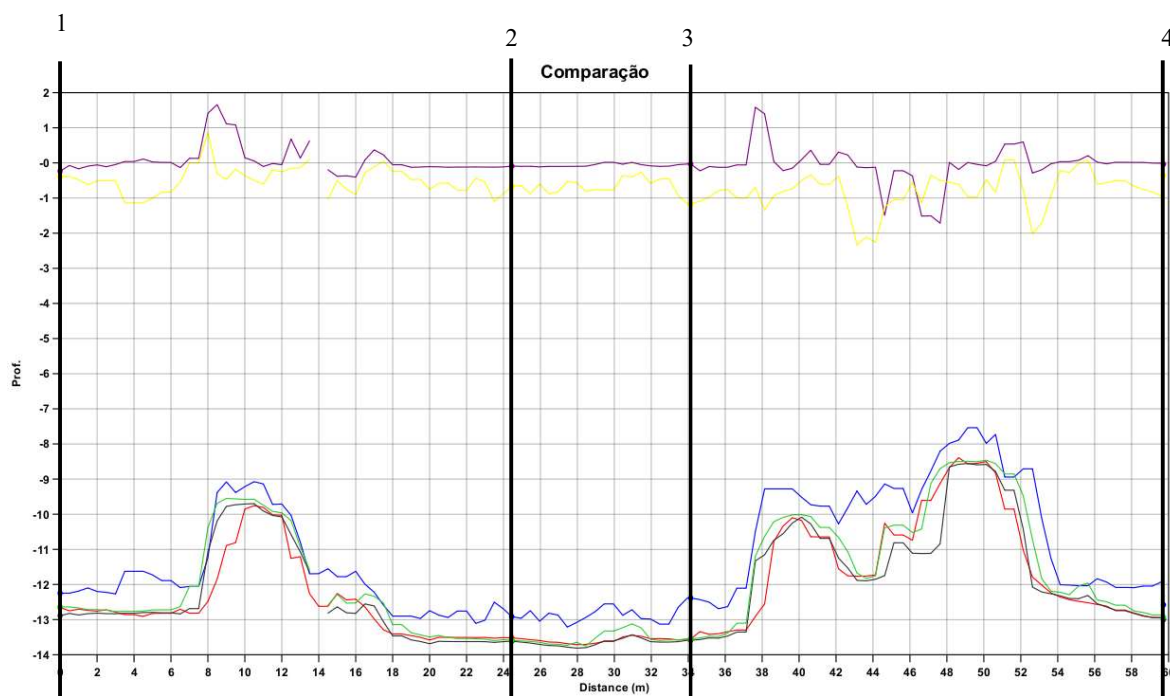


Figura 67 – Perfil 3 (orientação 1 à 2 – SE-NW, 2 à 3 – SW-NE e 3 à 4 – NW-SE). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

O que é notável pela visualização em perfis é que as camadas *Depth* e *Shoal* das superfícies multifeixe e a camada *Depth* da superfície interferométrica apresentam valores

muito aproximados, enquanto a camada *Shoal* da superfície interferométrica apresenta valores mais rasos, devido à grande dispersão dos dados. Onde tal padrão não ocorre é nas bordas das rochas, como se pode visualizar melhor abaixo (Figura 68 e Figura 69).

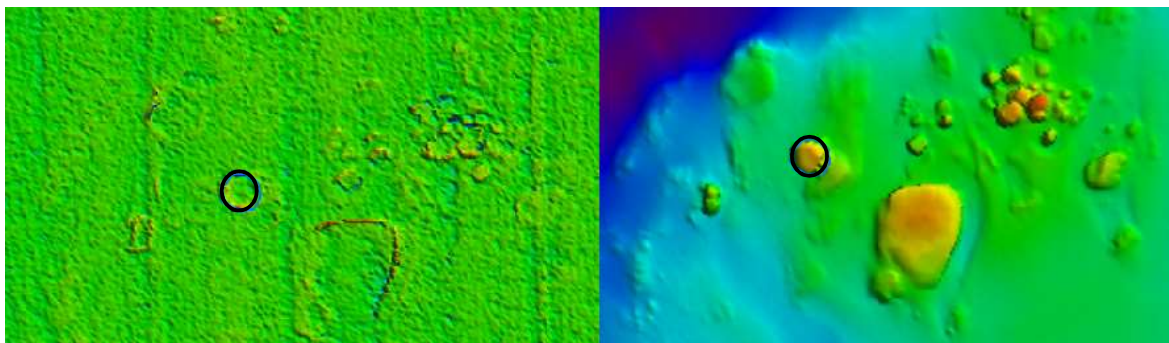


Figura 68 – Perfil 4 (perfil circular em preto). Borda da rocha.

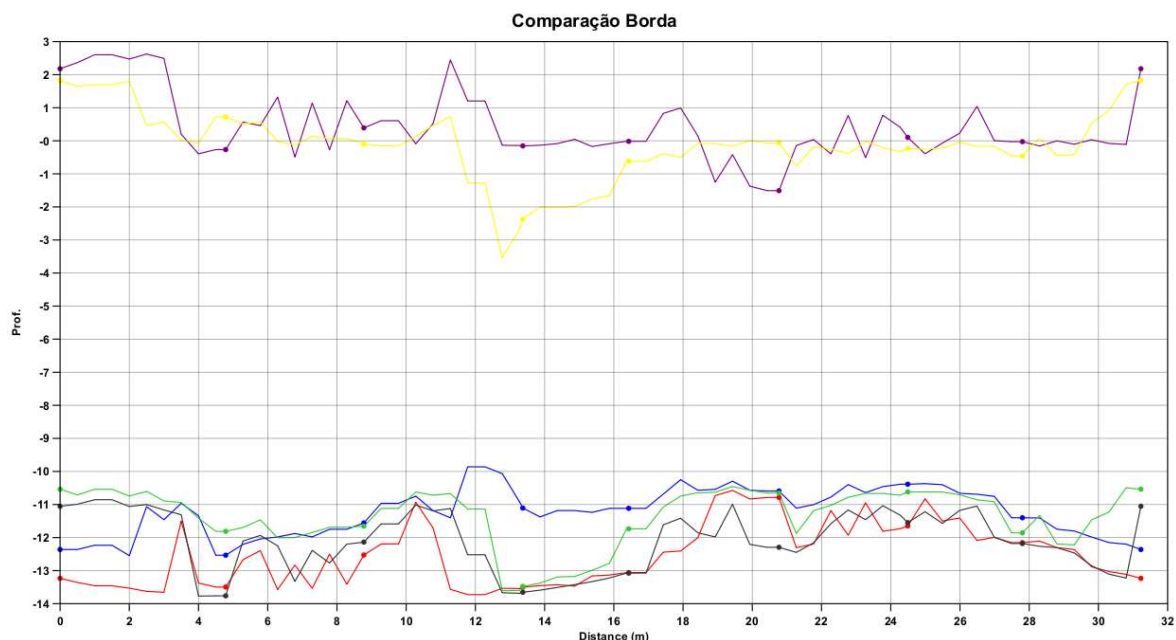


Figura 69 – Perfil 4 (circular). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

Aqui observa-se um perfil diferente dos vistos acima. Apesar de poder observar o mesmo efeito de descasamento nos perfis anteriores nas regiões de transição de área plana para rochosa, aqui se pode visualizar melhor, pois o perfil foi gerado justamente nessa área. Os perfis

preto e verde se parecem, mas os perfis vermelho e azul aparentam não ter uma grande correlação e descasam com frequência dos dois primeiros citados. Isto mostra a dificuldade do PDBS em detectar feições que apresentam gradientes abruptos. Tal efeito já está previsto na literatura (*layover*).

4.1.4 Conclusões área 1

A partir do que foi visualizado acima, pode-se concluir que:

- 1 – A precisão do PDBS, quando observada através da incerteza da hipótese, se encaixa dentro do intervalo preconizado para Ordem Especial pela OHI. Isto demonstra que os sensores e periféricos utilizados são de alta qualidade de precisão e, ao propagar suas incertezas, o resultado final não foi afetado;
- 2 – A afirmação 1 pode ser vista através do gráfico comparativo de TPU (Figura 52), onde as maiores fontes de incerteza que contribuíram para a IVT final foram as incertezas na medição do calado (devido ao constante movimento da embarcação por ocasião da medição) e à incerteza do cálculo do calado devido ao consumo de combustível (fornecido pela própria lancha), ambas incertezas presentes nos dois sensores. O que diferencia muito um gráfico do outro é uma maior presença do efeito da incerteza do *heave*. O sensor de *heave* utilizado com o multifeixe foi o MRU-5, com uma incerteza de 0,02 m, enquanto o utilizado com o interferométrico foi o Aplanix, com uma incerteza de 0,05 m. Tal diferença pode explicar o ocorrido, bem como o algoritmo de propagação de incerteza de cada sensor, onde cada variável tem pesos diferentes;
- 3 – A quantidade de ruído constante na sondagem do PDBS é bem maior do que em uma sondagem com o MBES;
- 4 – A precisão do PDBS quando observada à luz da incerteza amostral de cada nó apresenta valores maiores e que não se enquadram dentro da Ordem Especial. Tal fato demonstra uma grande dispersão dos dados considerados válidos durante o processamento. Isto indica que o algoritmo estatístico de processamento de sondagem ainda tem que evoluir, ou devem ser tomadas algumas precauções e estabelecidos procedimentos que não foram contemplados no presente trabalho (tais como um processamento manual após o estatístico ou a passagem de um filtro CUBE);

5 – Por sua vez, quando se faz o mesmo teste tendo como parâmetros os valores da Ordem 1a, observa-se que a sondagem fica dentro deste intervalo, podendo-se dizer que, por este critério, os dois levantamentos são satisfatórios para esta ordem;

6 – Na análise de acurácia, levando o multifeixe como sensor padrão, observou-se que as hipóteses variam muito pouco em seus valores representativos da batimetria, sendo que sua camada representativa (*Depth*) acusou uma diferença de 10 cm, com o PDBS sendo mais raso. Assim, o processamento utilizando o interpolador CUBE foi capaz de identificar um solo marinho equivalente em ambos os sensores. Isto indica que para completar modelos ou cálculos de volume, principalmente para áreas planas, a diferença seria na ordem do decímetro;

7 – Entretanto, quando se entra no campo da segurança da navegação, é levada em conta a profundidade mais rasa que foi considerada válida durante o processamento. Isso faz com que a camada que seja exportada para a carta náutica seja a camada *Shoal*. Quando se comparam ambas as camadas na superfície multifeixe e interferométrica, observa-se uma diferença média de 0,6 m. Tal fato, a princípio, pode parecer favorável a segurança da navegação, uma vez que estabelece profundidades mais rasas. Entretanto, tal informação, uma vez que não seja verdadeira, diminui o calado de navegação em áreas críticas, tais como portos ou estreitos de rios o que pode vir a causar a impossibilidade de navegação de determinada classe de navio ou até mesmo a inavergabilidade da área. A diferença da camada *Shoal* ser 0,5 m maior do que a camada *Depth* é explicada pela dispersão dos dados do interferométrico;

8 – Na análise das feições fins da área 1, que são as rochas, pode-se observar, através de perfis, que as profundidades desses alvos se mantêm constantes e em conformidade com as áreas planas. Contudo, a definição da forma de cada rocha varia ligeiramente. Isto se deve ao fato de os limites das rochas terem diferenças significativas (de -2,7 m a 4,0 m). Realmente, já está prevista na literatura a dificuldade do interferométrico em identificar perfis abruptos quando estes são suscetíveis ao efeito de *layover*. Aqui, isto é mostrado mais uma vez. Contudo este

erro pode ser absorvido³⁰ pela escala da carta³¹, e dependendo da mesma, não vem a causar riscos à navegação. Porém tal aspecto deve ser discutido e analisado caso a caso; e

9 – A mesmas feições-alvos detectadas pelo MBES, também foram detectadas pelo PDBS.

4.2 ÁREA 2 – TESTE DE INCLINAÇÃO

De forma análoga, a Tabela 10 contém as principais informações sobre a sondagem realizada na área 2 (Figura 70 e Figura 71).

³⁰ Por erro absorvido pela escala da carta ou pela seleção de sondagem, pode-se considerar que quando a distância de incerteza seja dividida pelo fator de escala da Carta Náutica, este seja menor do que 0,28 mm (valor da classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica para documentos digitais (PEC-PCD) (Santos *et al.*, 2016)). Ex.: Diga-se que existe uma incerteza de definição da borda de uma rocha de 1 m. Caso a escala da carta seja 1:15.000, a representação gráfica dessa incerteza seria de 0,06 mm e, portanto, menor do que 0,28 mm. Diz-se então que a incerteza não tem nenhuma representação e não pode ser plotada nem levada em conta naquela carta náutica e que, portanto, a incerteza foi absorvida pela escala da carta ou pela seleção de sondagem.

³¹ Segundo o III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro, as Cartas de Aproximação e de Porto para cartas em papel têm suas escalas variando entre 1:5.000 (Carta 721 (Plano) – Terminal Salineiro de Areia Branca) e 1:100.000 (Carta 1310 – Canal dos Abrolhos e Proximidades). As Cartas das Ilhas Oceânicas apresentam cartas com escalas maiores, como de 1:1.000 (Carta 11 (Plano) – Arquipélago de São Pedro e São Paulo). No que tange às cartas eletrônicas, apesar de estarem em outra plataforma de visualização, guardam correspondência com a carta em papel, de modo que as escalas se mantêm (DHN, 2016).

Tabela 10 – Dados informativos da área 2 (azul), relativos à precisão (rosa) e relativos à acurácia (coral).

Parâmetros	Kongsberg EM 2040	Hydroacoustic Geoswath 4R
Comprimento (dimensão considerada no sentido das linhas) (~m)	690	750
Largura (dimensão considerada no sentido transversal às linhas) (~m)	270	300
Área sondada (~km ²)	0,18	0,23
Quantidade de linhas	10	10
Distância entre linhas (~m)	25	25
Direção das linhas (~°)	040 - 140	040 - 140
Velocidade de sondagem (m/s)	2,17	2,17
Resolução da superfície (m)	0,5	0,5
Quantidade de células	920.471	1.068.794
Incerteza média da hipótese (m)	0,1	0,2
Inclusão Ordem Especial – Eq. 2	100% dos nós	100% dos nós
Desvio padrão médio do nó (m)	0	0,2
Inclusão Ordem Especial (baseado na incerteza amostral do nó – Eq. 4	99,8% do nós	21,9% dos nós
Densidade (média da quantidade de pings que contribuíram para 1 nó)	48	268,5
QC Report		Ordem Especial
<i>Depth</i> _{MBES} - <i>Depth</i> _{PDBS}		$\mu = 0,1$ m, MÍN = -0,7 m e MAX = 1,5 m
<i>Shoal</i> _{MBES} - <i>Shoal</i> _{PDBS}		$\mu = 0,7$ m, MÍN = -0,7 m e MAX = 2,5 m

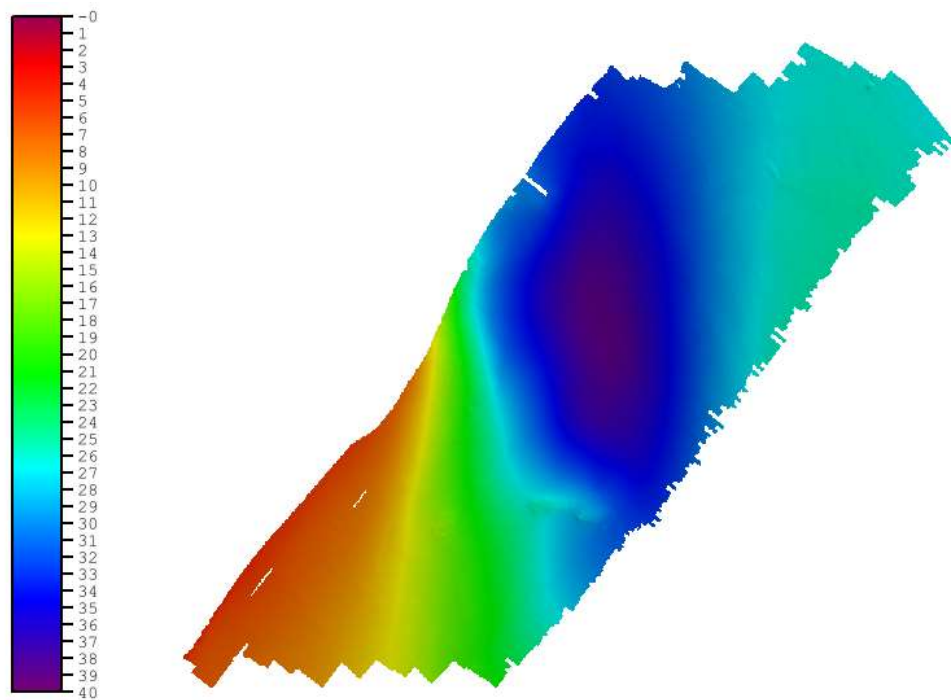


Figura 70 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade (camada Depth) do MBES. Escala em metros.

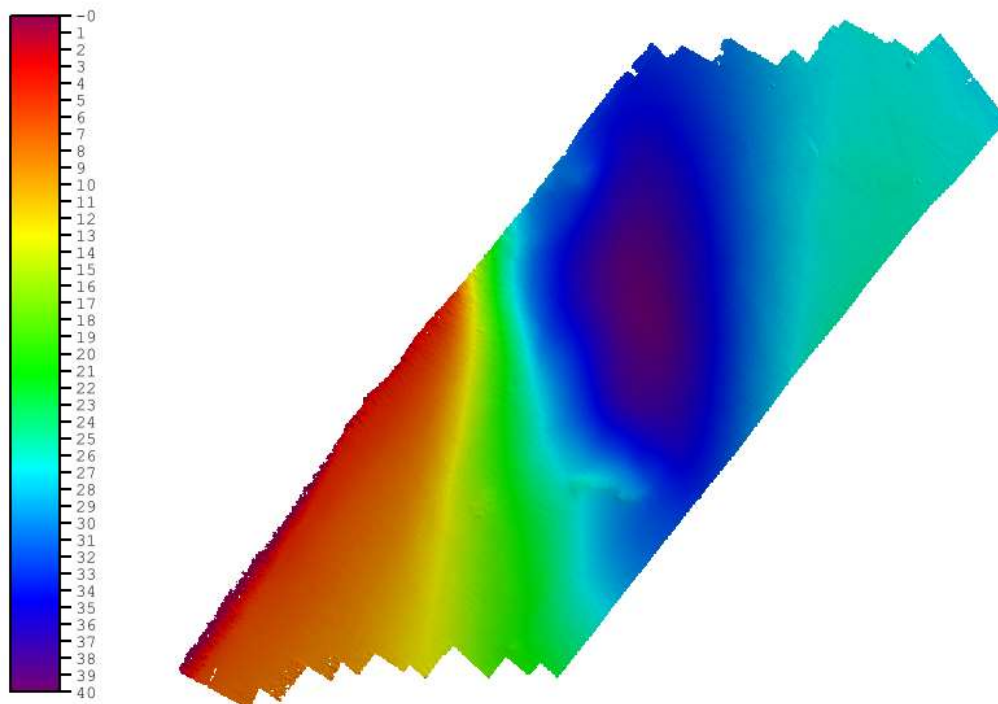


Figura 71 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade (camada Depth) do PDBS. Escala em metros.

4.2.1 *Precisão*

Na superfície gerada a partir dos dados adquiridos com o MBES, a incerteza média da hipótese foi de 0,1 m e o desvio padrão médio do nó foi de 0 m, em 920.471 células analisadas e uma média de 48 *pings* contribuíram para cada nó. Após o cálculo da incerteza da hipótese, verificou-se que todas as células apresentaram valores negativos. Com o cálculo da incerteza do nó com relação ao intervalo da Ordem Especial, foi visto que 99,5% das células analisadas foram negativas. Assim, por ambos os critérios considerados, a sondagem atingiu Ordem Especial.

Na superfície gerada com os dados advindos do PDBS, a incerteza média da hipótese foi de 0,2 m e o desvio padrão médio do nó foi de 0,2 m, em 1.068.794 células analisadas e uma média de 268,5 *pings* em cada nó. A incerteza da hipótese frente à Ordem Especial foi 100% negativo. Por sua vez, a incerteza do nó foi de 36,8% de resultados negativos.

No que tange ao IVT, valem as mesmas considerações realizadas para a área 1, visto que os gráficos são eminentemente similares (Figura 72).

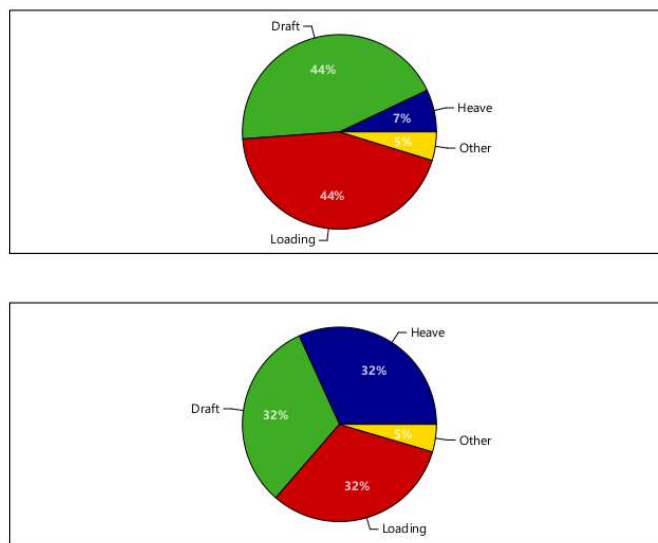


Figura 72 – Gráfico demonstrando as fontes de incerteza de cada sensor para a área 2. O gráfico de cima corresponde ao MBES, enquanto o de baixo ao PDBS.

O mesmo vale para as imagens observadas com o *subset editor* (Figura 73 e Figura 74). Aqui, mais uma vez, se observa a dispersão dos dados do interferométrico bem como a grande quantidade de ruído que foi retirado no processamento.

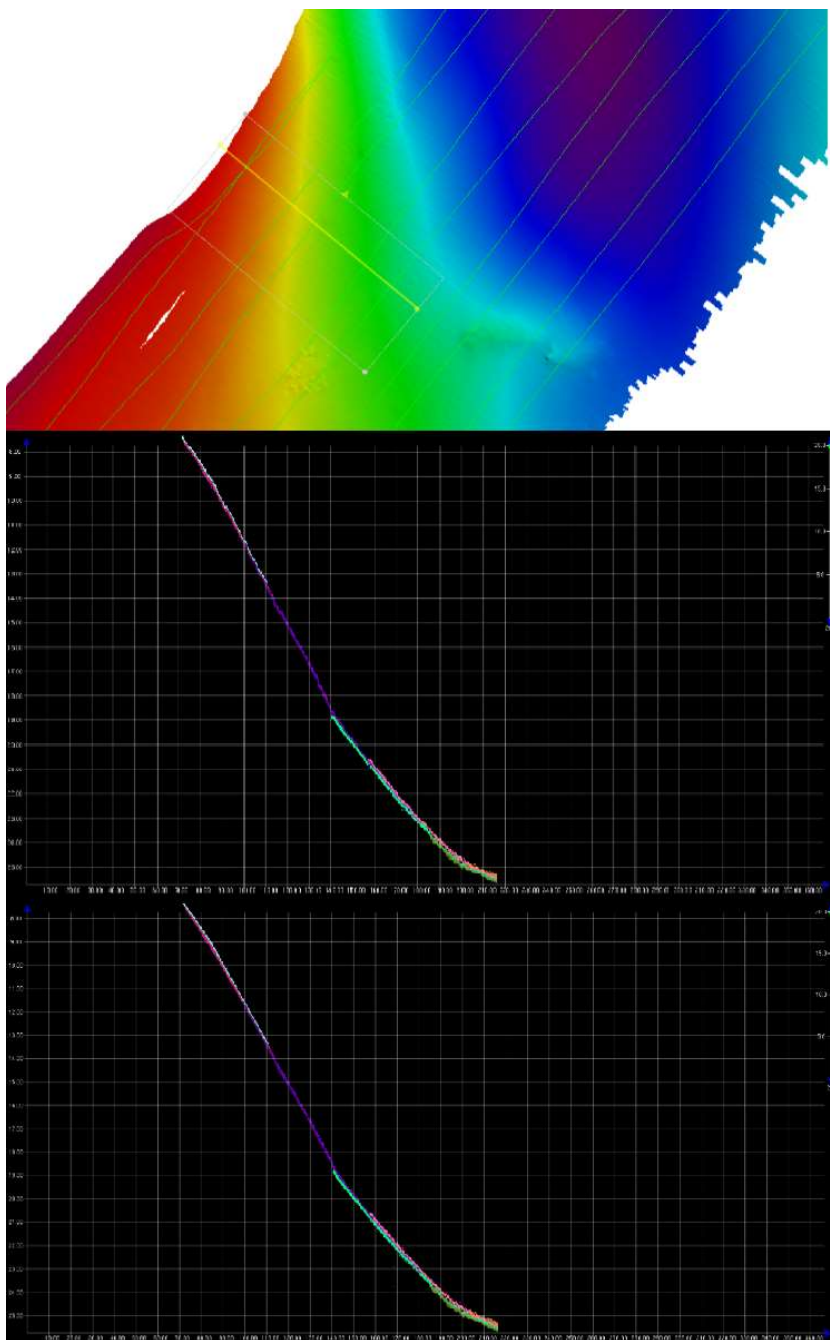


Figura 73 – Área observada por meio do subset editor para uma sondagem com o MBES. O primeiro quadro é o setor em que foi realizado o perfil. O perfil visualizado nos quadros abaixo está dentro da tarjeta amarela, que tem espessura de 1 m. A visão é de ré, o que significa que os dois últimos quadros mostram todos os pings dentro da faixa amarela como se o visualizador estivesse no ponto mais baixo da figura. As cores diferentes de cada perfil significam que pertencem a linhas de sondagens diferentes. O exagero vertical está em 20 vezes. O segundo quadro mostra o perfil com os dados considerados válidos. O terceiro mostra com os dados rejeitados. Esta mesma diagramação será usada para todas as figuras do que contenham imagens do subset editor.

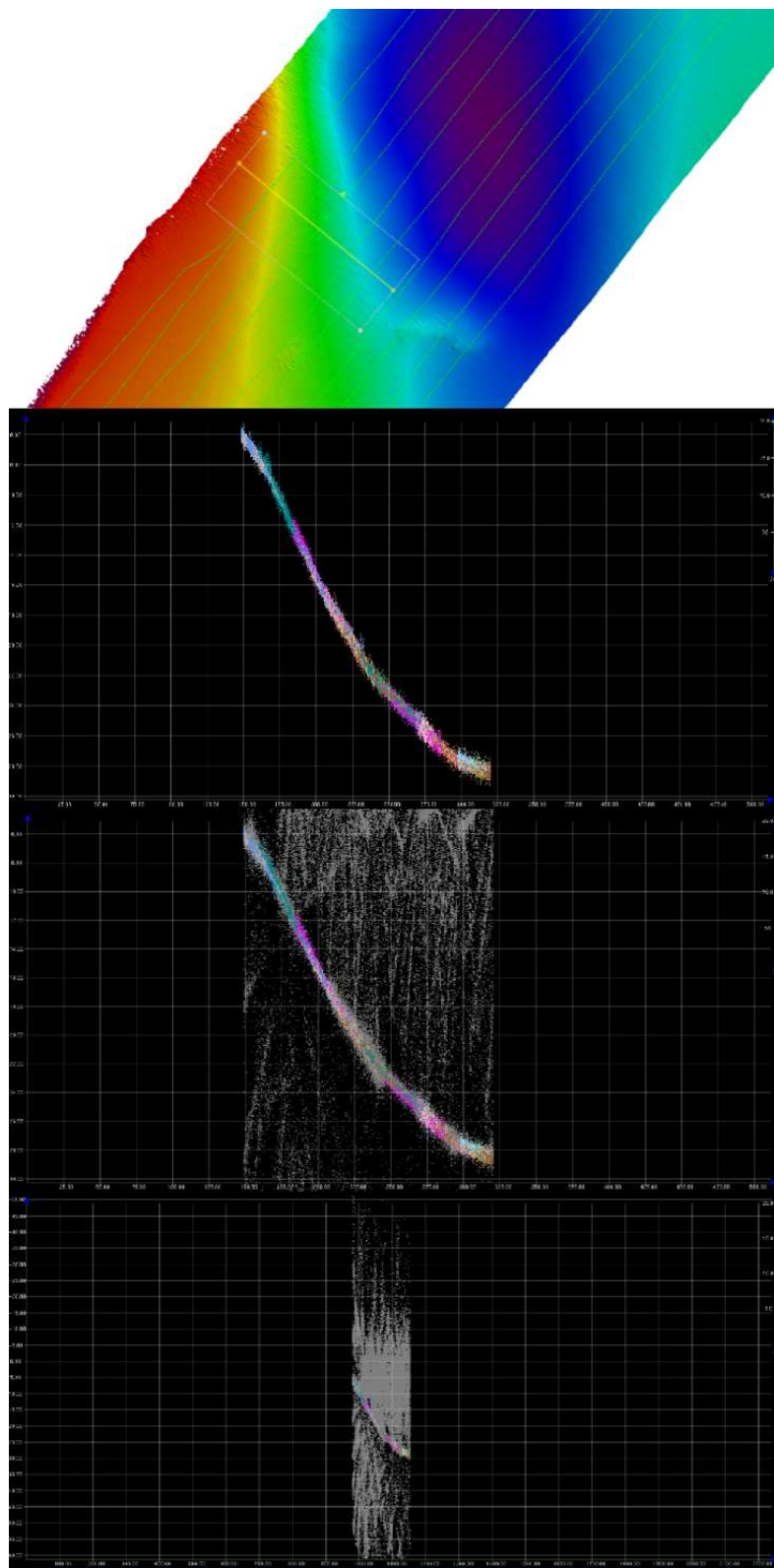


Figura 74 – Mesma área da figura anterior com sondagem PDBS. Foi inserido mais um quadro para mostrar a quantidade de ruído total que vem na sondagem. Os pontos em cinza representam as profundidades que não foram consideradas válidas.

Com relação à incerteza da hipótese e à incerteza amostral de cada nó, pode-se observar grande semelhança com as imagens da área 1 (Figura 75 e Figura 76), indicando uma repetição do padrão. Não se pretende aqui repetir as considerações exaradas para a área 1, visto que seriam as mesmas. Contudo, é de interesse verificar como a incerteza amostral do nó da superfície interferométrica se comportaria frente ao intervalo preconizado para a Ordem 1a.



Figura 75 – Camadas de superfícies da área 2 criadas a partir das equações 3 e 5. A da esquerda é representativa da incerteza da hipótese. A da direita é representativa da incerteza amostral do nó. Ambas são relativas ao ecobatímetro multifeixe. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem Especial, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

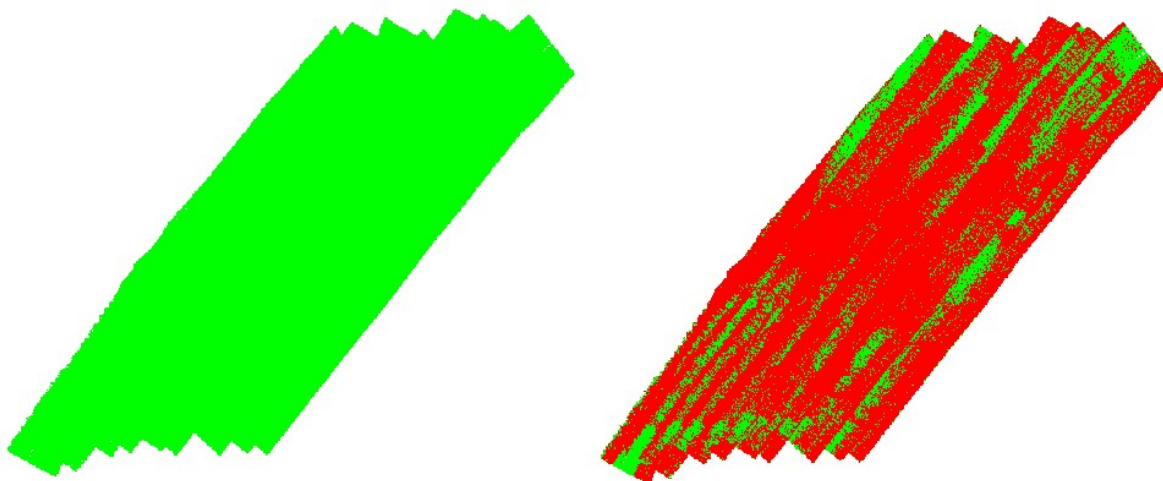


Figura 76 – Camadas de superfícies da área 2 criadas a partir das equações 3 e 5. A da esquerda é representativa da incerteza da hipótese. A da direita é representativa da incerteza amostral do nó. Ambas são relativas ao sonar de varredura lateral interferométrico. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem Especial, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

Da mesma forma que na área 1, a incerteza amostral do nó coadunou com a Ordem 1a, em uma taxa de 96,8% (Figura 77).

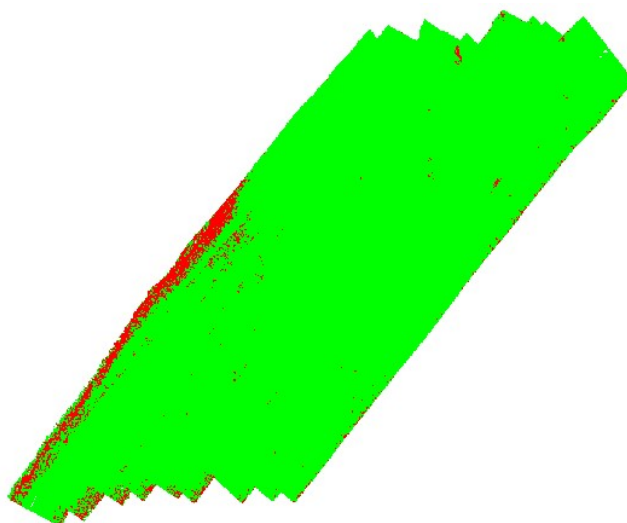


Figura 77 – Camada de superfície resultante da equação 6, mostrando que os resultados se enquadram dentro da Ordem 1a. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem 1a, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

4.2.2 Acurácia

A ferramenta do *QC Report* apresentou que todos os feixes ficaram acima de 95% para Ordem Especial. A diferença média da camada *Depth* das duas superfícies foi de 0,1 m, com um mínimo de -0,7 m e um máximo de 1,5 m. Na camada *Shoal*, a média foi de 0,7 m, com um mínimo de -0,7 m e um máximo de 2,5 m.

De forma análoga aos resultados alcançados na área 1, percebe-se uma pequena variação das profundidades advindas do multifeixe e do interferométrico (camada *Depth* – Figura 78). Quanto à camada *Shoal* (Figura 79), observa-se um aumento para 0,7 m, onde cabem as mesmas considerações da área 1.

Analisando as feições-alvos – variações de gradiente do fundo marinho – pode-se observar algumas considerações conforme as observações em perfil.



Figura 78 – Superfície diferença para a área 2. A diferença é entre as camadas Depth do MBES e do PDBS.

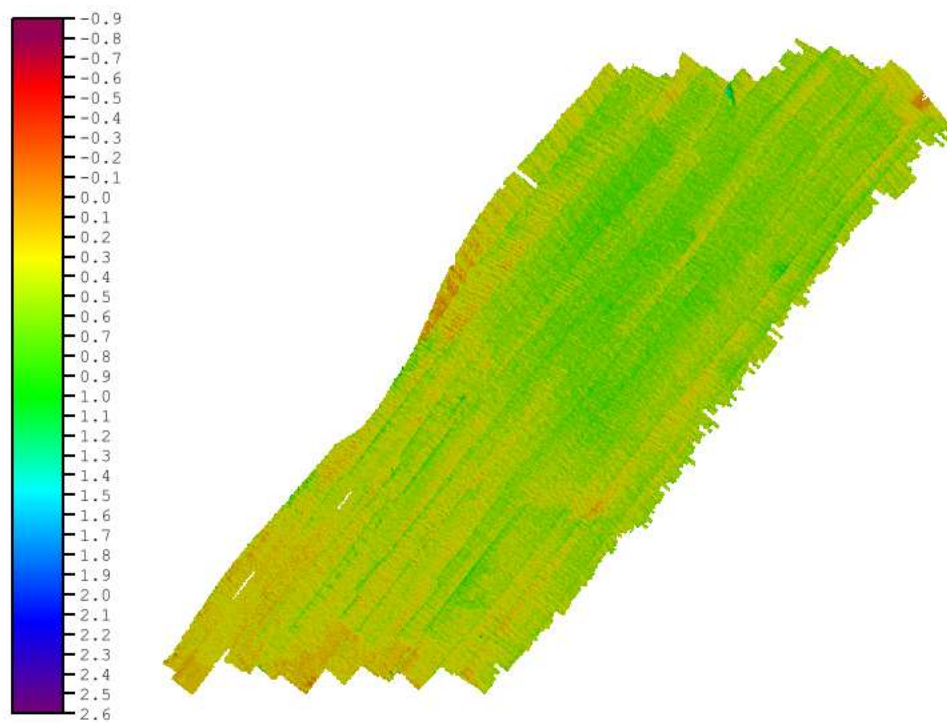


Figura 79 – Superfície diferença para a área 2. A diferença é entre as camadas Shoal do MBES e do PDBS.

4.2.3 *Análise das feições-alvos – mudança de gradiente do fundo marinho*

Nessa área, deu-se principal atenção às alterações de gradiente do fundo marinho, e como estas seriam percebidas pelo PDBS, à luz do MBES (Figura 80 à Figura 85).

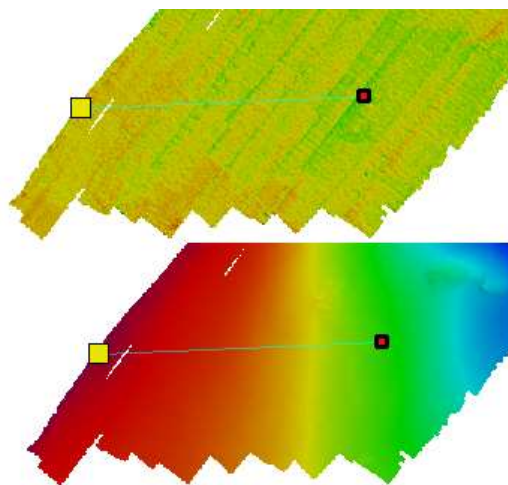


Figura 80 – Área do perfil 1. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação W-E).

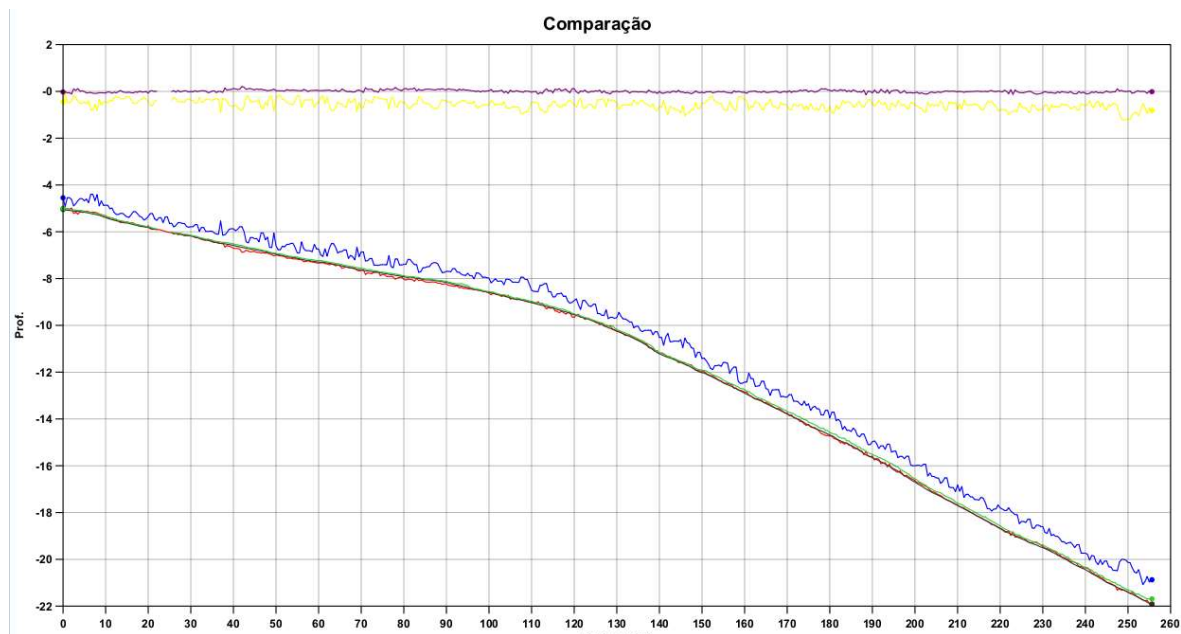


Figura 81 – Perfil 1 (orientação W-E). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

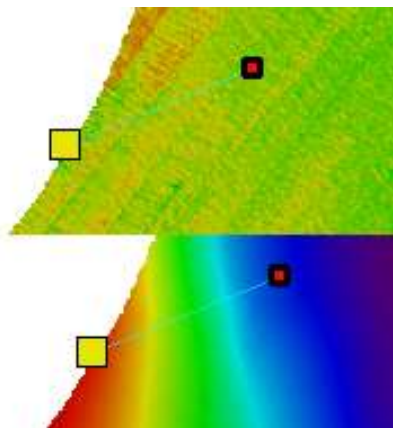


Figura 82 – Área do perfil 2. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação SW-NE).

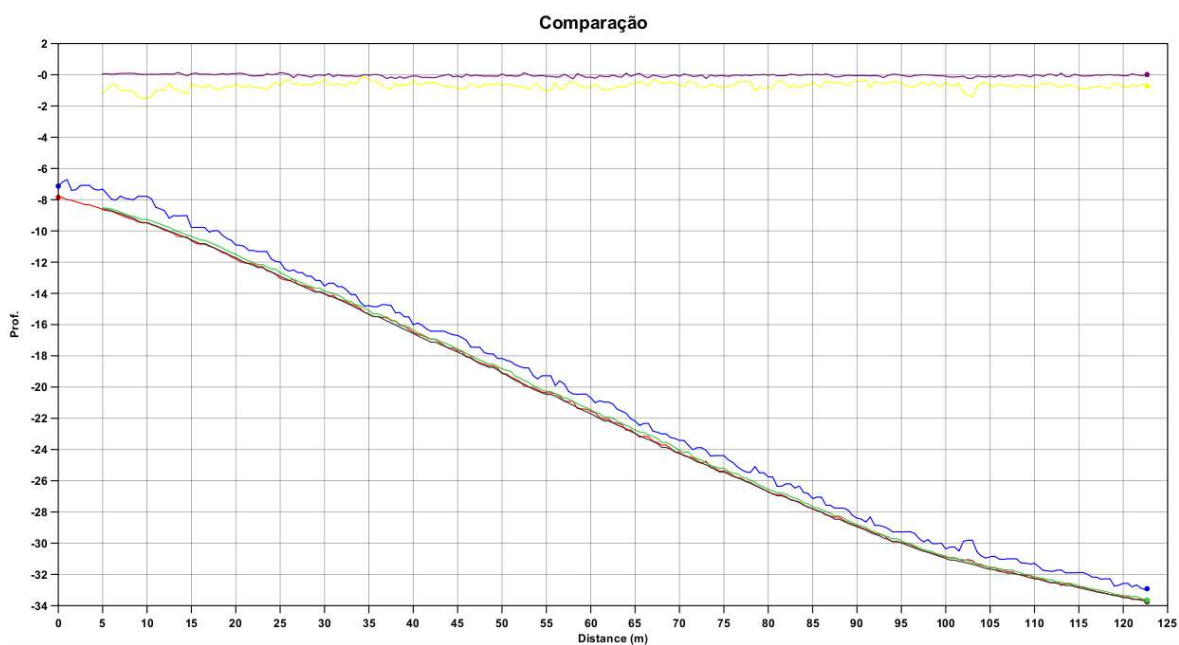


Figura 83 – Perfil 2 (orientação SW-NE). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

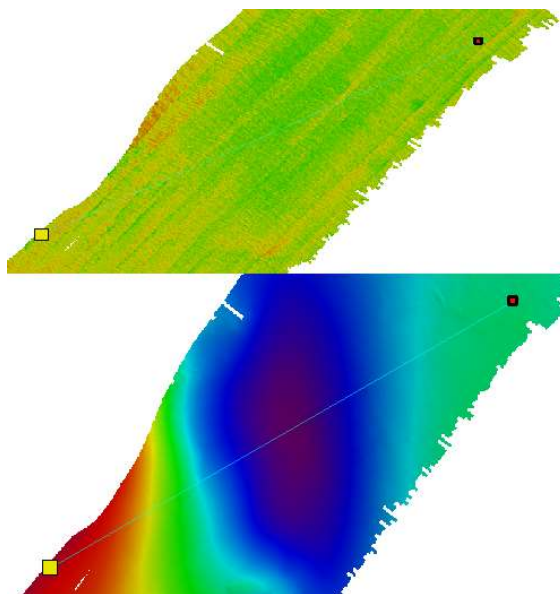


Figura 84 – Área do perfil 3. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação SW-NE).

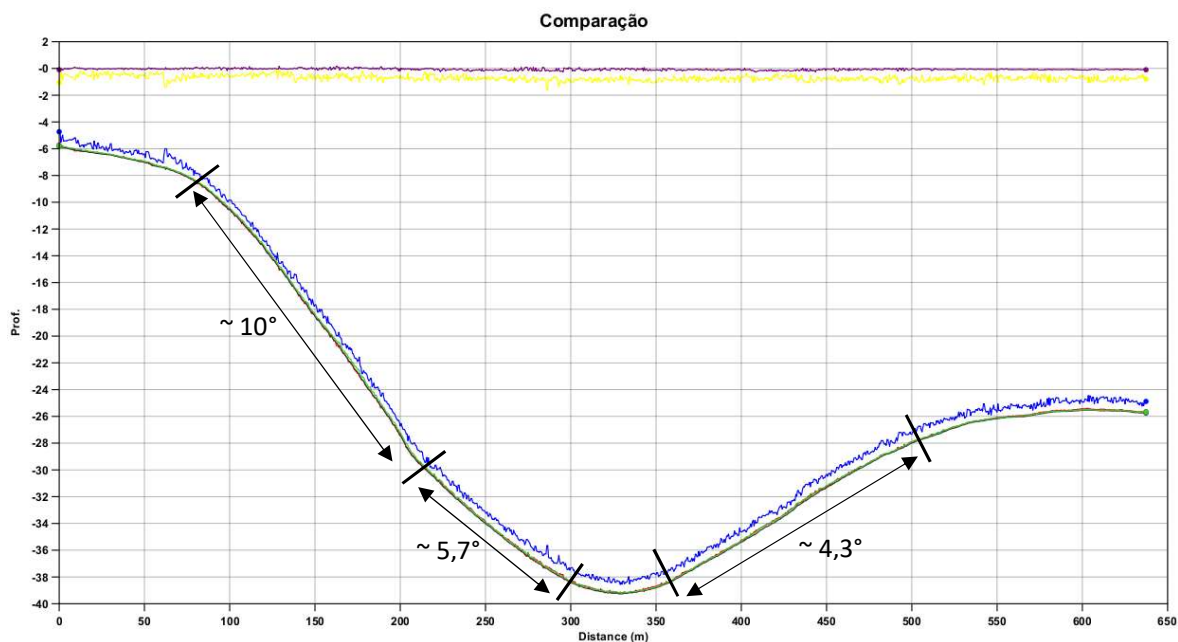


Figura 85 – Perfil 3 (orientação SW-NE). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

Foram realizados perfis ao longo de trechos com grandes variações de profundidades em pequenas distâncias, sendo observadas 3 áreas com diferentes inclinações. Interessante observar que o perfil lilás que representa a superfície diferença das camadas *Depth* se mantém

muito próxima de 0 m, mostrando que a diferença no cálculo das profundidades é praticamente nula. Já as diferenças das camadas *Shoal* são ligeiramente positivas (ver nota de rodapé 29), o que mostra que a superfície *Shoal* do PDBS apresenta valores mais rasos em todos os perfis, sendo que este padrão também se mantém durante os gradientes.

4.2.4 Conclusão área 2

A partir do que foi apresentado anteriormente, pode-se concluir que:

1 – São mantidas as mesmas conclusões 1 a 7 da área 1, salvo pequenas variações nos valores de diferença, mas que não afetam as conclusões;

2 – Com relação às feições alvos, praticamente não existe diferença de performance entre os dois sistemas em calcular gradientes abruptos do fundo marinho (com exceção na presença de alvos naturais, como rochas, ou feitos pelo homem, como embarcações naufragadas. Tais perspectivas foram analisadas nas áreas 1, 3 e 4).

3 – Para melhor analisar tal capacidade, é interessante fazer uma comparação entre os valores dos gradientes do terreno e o que a literatura pauta como sendo os gradientes possíveis de calcular. Pela literatura, voltando ao item 2.4.4, sabe-se que existe o efeito de ambiguidade por iguais distâncias, ou *layover*. Esse efeito ocorre quando dois ecos de retorno, de feições diferentes, chegam ao mesmo tempo ao transdutor. Como não existem ângulos setorizados de escuta como no multifeixe, o sensor processa os dois sinais juntos, chegando a uma informação espúria, que não representa nem uma feição nem outra, sendo representada como ruído. Essa situação ocorre no nadir e em regiões inclinadas. Pela Figura 86, é possível visualizar melhor como este efeito ocorre em feições inclinadas. Nesta figura, tem-se o fundo marinho representado em azul, um fundo imaginário de maior inclinação em verde pontilhado, o sensor em amarelo e a frente de onda³² em laranja. É possível perceber que, no caso do fundo azul, cuja inclinação é menor do que o ângulo de abertura θ , o eco de retorno B terá percorrido distância maior do que o eco de retorno A. Caso fosse considerado o fundo verde, a situação se inverteria e B seria menor que A. Nesta situação, B chegaria ao sensor ao mesmo tempo em que algum outro sinal refletido no solo, o que geraria ambiguidade e, portanto, ruído. Assim,

³² A frente de onda, nesta figura, está sendo representada por uma reta ao invés de um arco. Em campo distante, a frente de onda pode ser considerada como sendo uma reta de direção perpendicular ao sentido de sua propagação. Essa mesma relação vale para um campo mais próximo, pois o ângulo que o arco da frente de onda faz com o fundo marinho é medido através da tangente do arco no ponto de contato com o solo. Como o foco desta análise é o ângulo de inclinação, esta forma de representação da frente de onda atende ao intuito.

pode-se concluir que se $B \leq A$, haverá ambiguidade de informações, ou seja, caso a inclinação de alguma feição seja maior do que o complemento do ângulo de incidência α (*grazing angle*), ocorrerá o efeito de ambiguidade de distância.

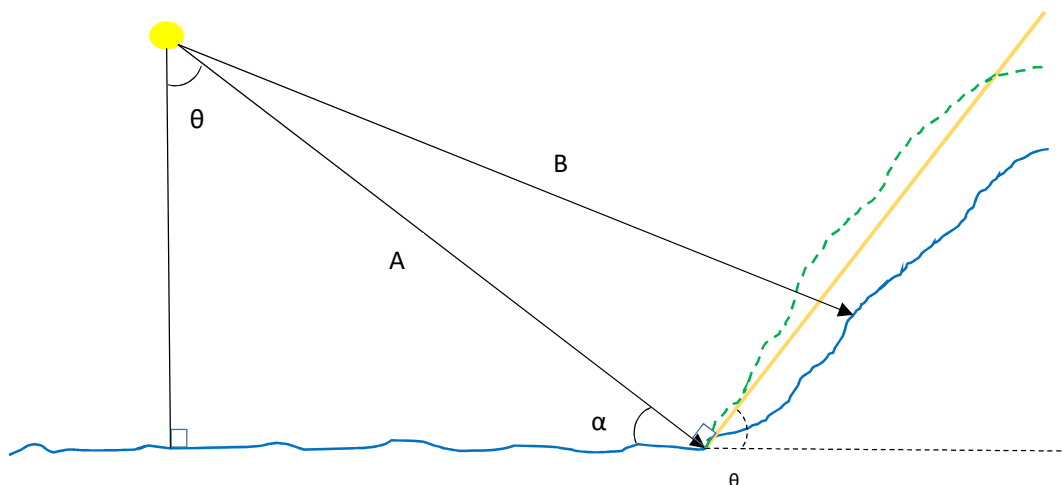


Figura 86 – Efeito de ambiguidade em regiões inclinadas. θ representa o ângulo de abertura do feixe (obliquidade), α representa o grazing angle, A e B representam diferentes distâncias percorridas pela frente de onda (coral). O círculo amarelo representa o PDBS. A linha em azul representa o fundo marinho e a linha tracejada em verde representa um fundo marinho imaginário cuja inclinação é maior que a abertura θ do feixe.

4 – A varredura útil do PDBS é de 10 a 12 vezes a profundidade, logo tem-se ângulos de ataque variando de aproximadamente $90^{\circ 33}$ a $(5,7^{\circ}$ a $4,3^{\circ})$, a depender da distância horizontal do sensor à determinada feição. Assim, sabe-se que feições com inclinações superiores a aproximadamente $85,7^{\circ}$ (tal fato vem a complementar a explicação da área 1, pois as rochas analisadas podem ter inclinações maiores que este valor) estarão sempre sujeitas ao efeito de *layover*.

5 – Uma vez tendo compreendido o fenômeno, cabe reanalisar a Figura 85 sob a perspectiva do gradiente do fundo marinho nas áreas mais inclinadas, cujos valores de inclinação são aproximadamente 10° , $5,7^{\circ}$ e $4,3^{\circ}$ (na figura aparenta ser maior porque o eixo x e y não estão com a mesma escala). Essas 3 áreas estão sujeitas ao *layover* dentro dos ângulos de ataque de 90° a 80° , podendo ocorrer apenas em uma área pequena da varredura. Soma-se o fato de o

³³ Diz-se aproximadamente 90° , pois no nadir existe também uma ambiguidade de distância que já foi explicada no item 2.4.4. A distância no fundo marinho em que ocorre a ambiguidade do nadir também pode ser mensurada pela fórmula: $((\text{profundidade} + \text{largura de pulso})^2 - (\text{profundidade})^2)^{(1/2)}$.

efeito na sondagem ser minorado pela superposição de linhas, haja visto que o sensor em outra posição não estará suscetível à essa perturbação. Logo, o efeito de *layover* existiu, mas se apresentou em forma de ruído e não prejudicou a sondagem devido à superposição de linhas.

4.3 ÁREA 3 – TESTE DE DETECÇÃO DE OBJETOS PROJETADOS PARA FORA DO MAR

As principais características da área 3 (Figura 87 e Figura 88) estão dispostas na Tabela 11:

Tabela 11 – Dados informativos da área 3 (azul), relativos à precisão (rosa) e relativos à acurácia (coral).

Parâmetros	Kongsberg EM 2040	Hydroacoustic Geoswath 4R
Comprimento (dimensão considerada no sentido das linhas) (~m)	425	425
Largura (dimensão considerada no sentido transversal às linhas) (~m)	150	175
Área sondada (~km ²)	0,06	0,07
Quantidade de linhas	10	10
Distância entre linhas (~m)	45 e 90	45 e 90
Direção das linhas (~°)	090 – 270 e 000 – 180	090 – 270 e 000 – 180
Velocidade de sondagem (m/s)	2,8	2,8
Resolução da superfície (m)	0,5	0,5
Quantidade de células	326.880	353.289
Incerteza média da hipótese (m)	0,1	0,2
Inclusão Ordem Especial – Eq. 2	100% dos nós	100% dos nós
Desvio padrão médio do nó (m)	0	0,2
Inclusão Ordem Especial (baseado na incerteza amostral do nó – Eq. 4)	99,1%	54%
Densidade (média da quantidade de pings que contribuíram para 1 nó)	49,2	120,1
<i>QC Report</i>		Ordem Especial
<i>Depth</i> _{MBES} - <i>Depth</i> _{PDBS}		$\mu = 0$ m, MÍN = -5,7 m e MAX = 6,7 m
<i>Shoal</i> _{MBES} - <i>Shoal</i> _{PDBS}		$\mu = 0,5$ m, MÍN = -4,9 m e MAX = 17,4 m



Figura 87 – Superfície CUBE MBES na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade (camada Depth) oriundas do levantamento com o MBES. Escala em metros.

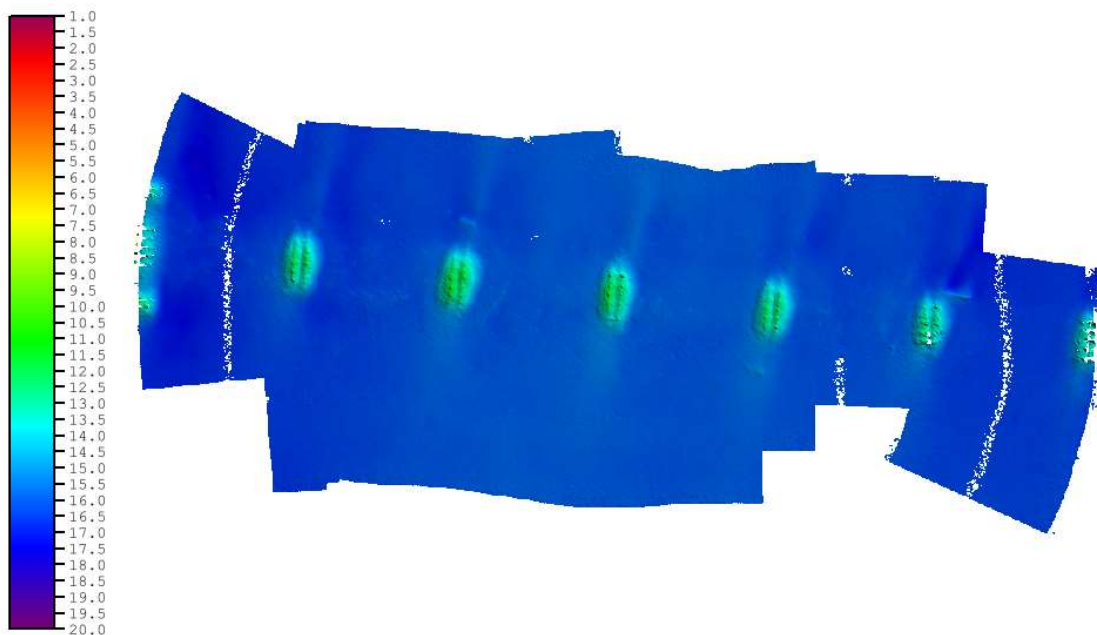


Figura 88 – Superfície CUBE PDBS na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade (camada Depth) oriundas do levantamento com o PDBS. Escala em metros.

4.3.1 Precisão

Com o sensor multifeixe, a superfície gerada teve como incerteza média da hipótese 0,1 m e o desvio padrão médio do nó 0 m, em um total de 326.880 células analisadas, com

aproximadamente 49,2 *pings* por nó. Tanto o cálculo de incerteza da hipótese quanto da incerteza amostral do nó, quando subtraídos do intervalo de tolerância da ordem especial, apresentaram valores negativos (100% e 99,5% respectivamente), indicando que por ambos os critérios foi possível atingir tal ordem.

Já no sensor interferométrico, a incerteza média da hipótese foi de 0,2 m e o desvio padrão médio do nó foi de 0,2 m, em 353.289 células analisadas, com uma média de 120,1 *pings* por nó. A incerteza da hipótese frente à Ordem Especial foi 100% negativo. Por sua vez, a incerteza do nó foi de 54% de resultados negativos.

Se tratando de IVT (Figura 89), pode-se observar um cenário similar às áreas 1 e 2, de forma que ainda estão em pauta as mesmas considerações elencadas por ocasião da análise da área 1.

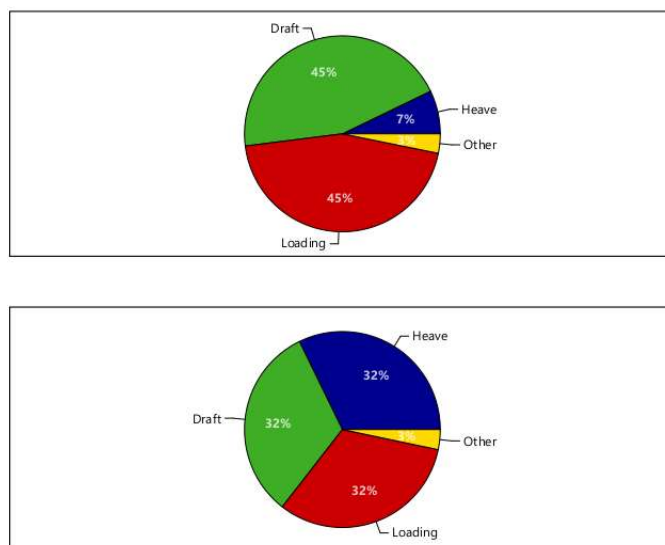


Figura 89 – Gráfico demonstrando as fontes de incerteza de cada sensor para a área 3. O gráfico de cima corresponde ao MBES, enquanto o de baixo ao PDBS.

De forma análoga, cabem as mesmas observações quando as sondagens de ambos os sensores são visualizadas por meio do *subset editor* (Figura 90 e Figura 91).

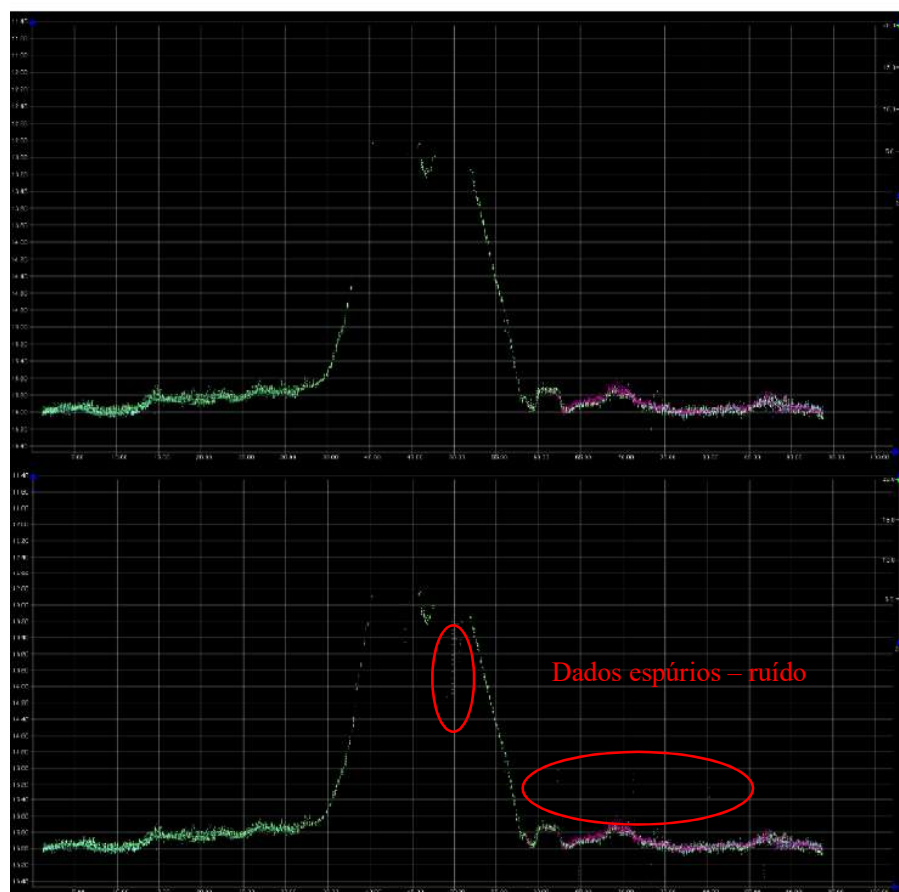
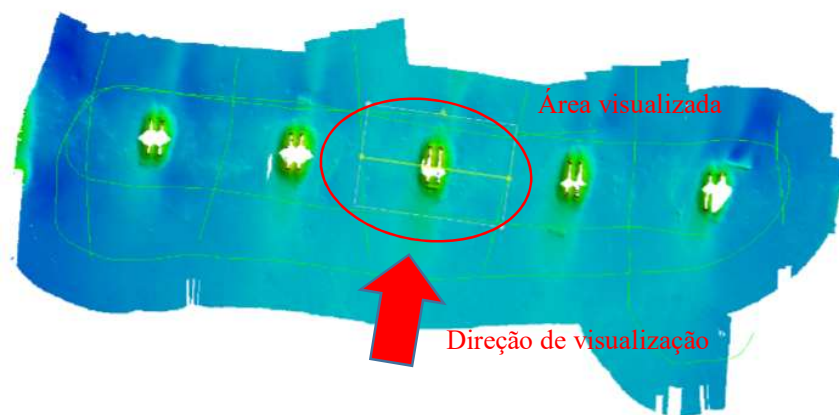


Figura 90 – Área observada por meio do subset editor para uma sondagem com o MBES. O primeiro quadro é o setor em que foi realizado o perfil. O perfil visualizado nos quadros abaixo está dentro da tarjeta amarela, que tem espessura de 1 m. A visão é de ré, o que significa que os dois últimos quadros mostram todos os pings dentro da faixa amarela como se o visualizador estivesse no ponto mais baixo da figura. As cores diferentes de cada perfil significam que pertencem a linhas de sondagens diferentes. O exagero vertical está em 20 vezes. O segundo quadro mostra o perfil com os dados considerados válidos. O terceiro mostra com os dados rejeitados. Esta mesma diagramação será usada para todas as figuras do que contenham imagens do subset editor.

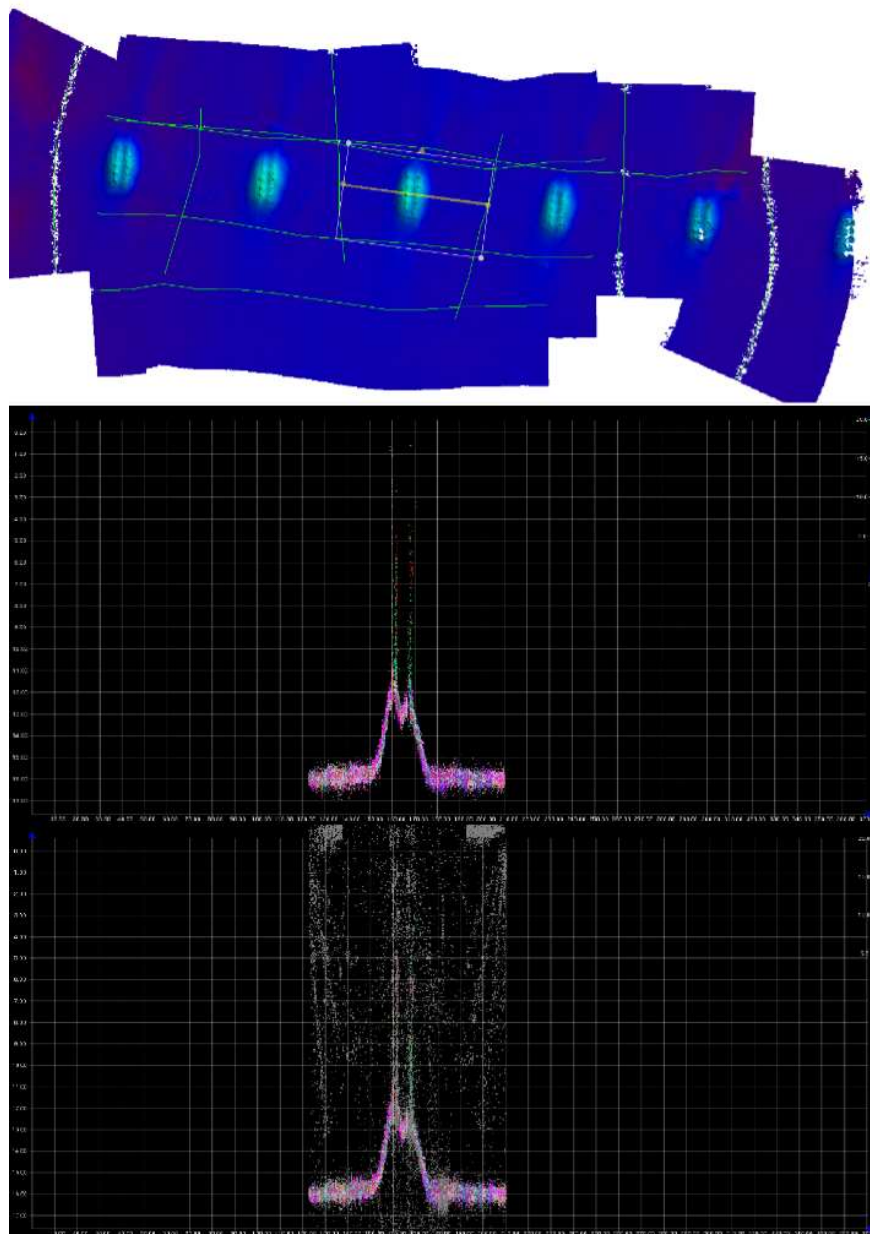


Figura 91 – Mesma área da figura anterior com sondagem PDBS. Os pontos em cinza representam as profundidades que não foram consideradas válidas.

Perscrutando a incerteza da hipótese e a incerteza amostral de cada nó (Figura 92 e Figura 93), observa-se o mesmo padrão das áreas anteriores. Uma vez que a incerteza amostral do nó ficou fora do critério de Ordem Especial, é necessário verificar como ela se comporta com a Ordem 1a.

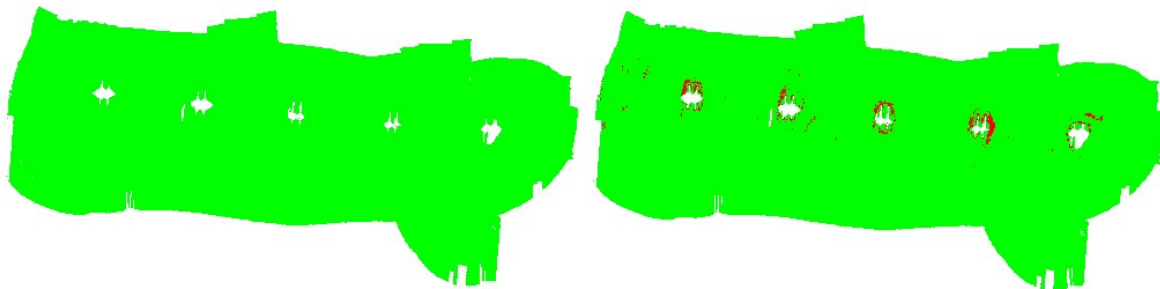


Figura 92 – Camadas de superfícies da área 3 criadas a partir das equações 3 e 5. A da esquerda é representativa da incerteza da hipótese. A da direita é representativa da incerteza amostral do nó. Ambas são relativas ao ecobatímetro multifeixe. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem Especial, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

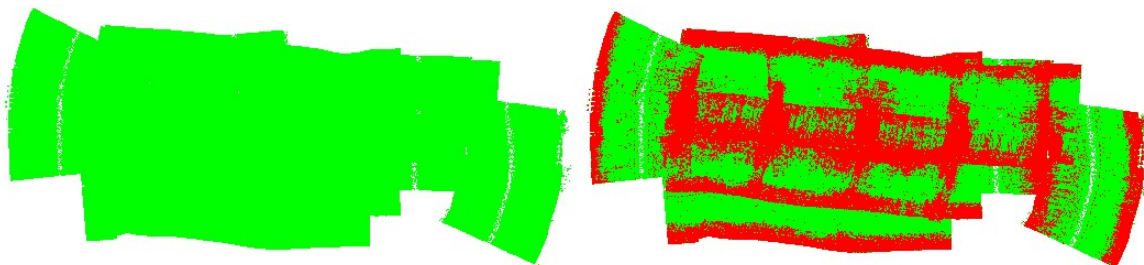


Figura 93 – Camadas de superfícies da área 3 criadas a partir das equações 3 e 5. A da esquerda é representativa da incerteza da hipótese. A da direita é representativa da incerteza amostral do nó. Ambas são relativas ao sonar de varredura lateral interferométrico. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem Especial, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

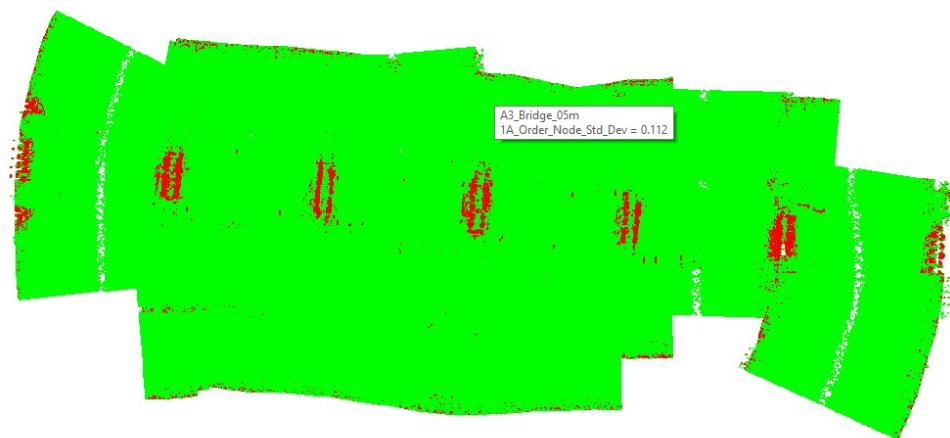


Figura 94 – Camada de superfície resultante da equação 6, mostrando que os resultados se enquadram dentro da Ordem 1a. Em vermelho estão os nós cujas incertezas amostrais ficaram fora do intervalo preconizado para Ordem 1a. Em verde estão os nós que tiveram suas incertezas dentro do preconizado para esta ordem.

Como visto acima, a sondagem com o sonar interferométrico teve sua incerteza amostral do nó dentro do intervalo da Ordem 1a (97,1% - Figura 94).

4.3.2 *Acurácia*

A ferramenta *QC Report* mostrou que todos os feixes ficaram acima de 95% para Ordem Especial. A diferença média da camada *Depth* das duas superfícies foi de 0 m, com um mínimo de -5,7 m e um máximo de 6,7 m. Na camada *Shoal*, a média foi de 0,5 m, com um mínimo de -4,9 m e um máximo de 17,4³⁴ m.

Devido à área ser majoritariamente plana, a diferença das camadas *Depth* (Figura 95) foi praticamente nenhuma. A diferença entre as camadas *Shoal* (Figura 96) teve uma pequena diferença. Além das considerações feitas para as áreas anteriores, é digno de nota o valor máximo alcançado pela superfície diferença entre as camadas *Shoal*. Isto se deve ao fato de o multifeixe não conseguir imagear algumas feições que o sensor interferométrico detectou. Enquanto na camada *Depth* do multifeixe existem grandes áreas sem informação válida nas regiões dos pilares da ponte, sua correlata interferométrica é capaz de não só preencher os espaços, com também estimar as profundidades de cada pilar. Tal situação será melhor analisada com os perfis das feições-alvos (pilares das pontes).

³⁴ Este valor é devido à diferença da geometria do feixe. Como o PDBS tem uma maior varredura, ele consegue detectar os pilares mais perto da superfície.

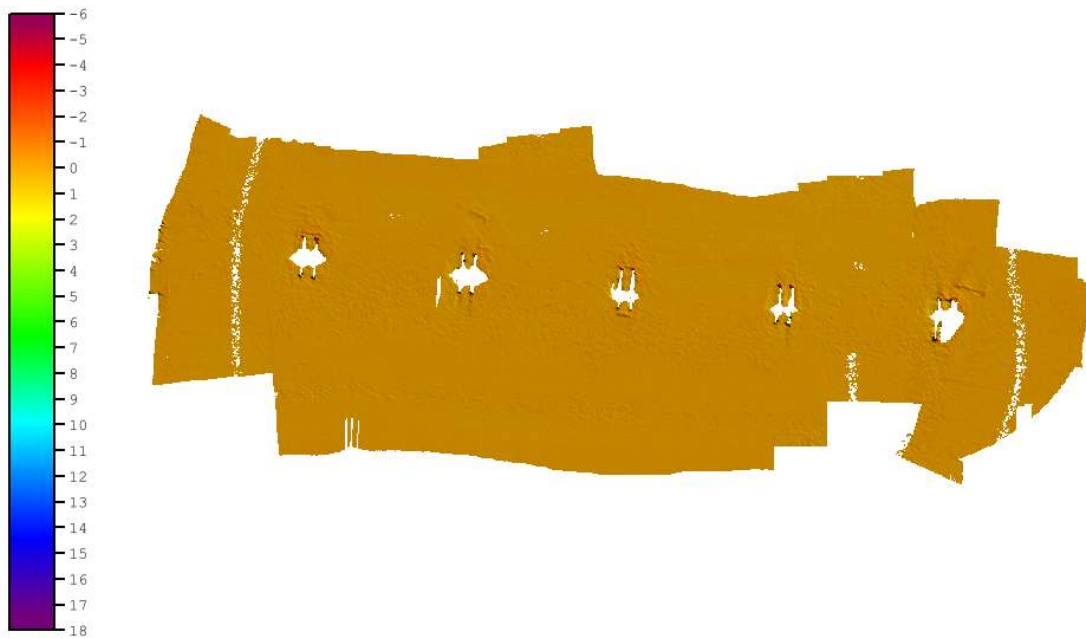


Figura 95 – Superfície diferença da camada Depth para a área 3.

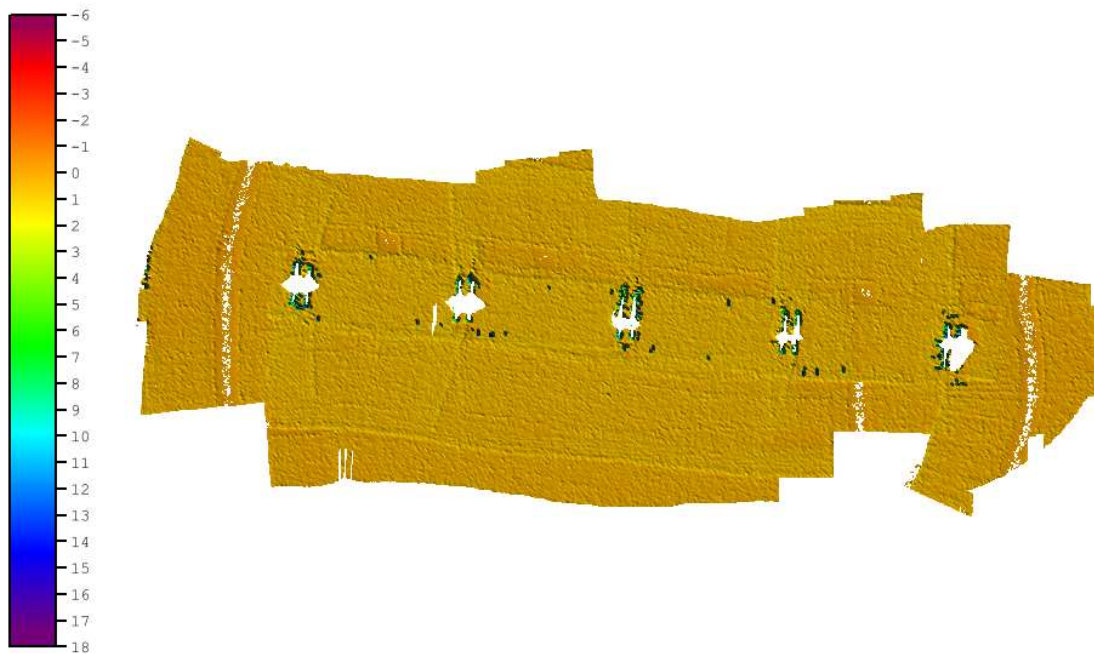


Figura 96 – Superfície diferença da camada Shoal para a área 3.

4.3.3 *Análise das feições alvos – pilares da Ponte Rio-Niterói*

Nos mesmos moldes das áreas anteriores, os perfis (Figura 97 à Figura 100) se concentraram nas áreas dos pilares das pontes, de modo a melhor poder comparar os dois sensores.

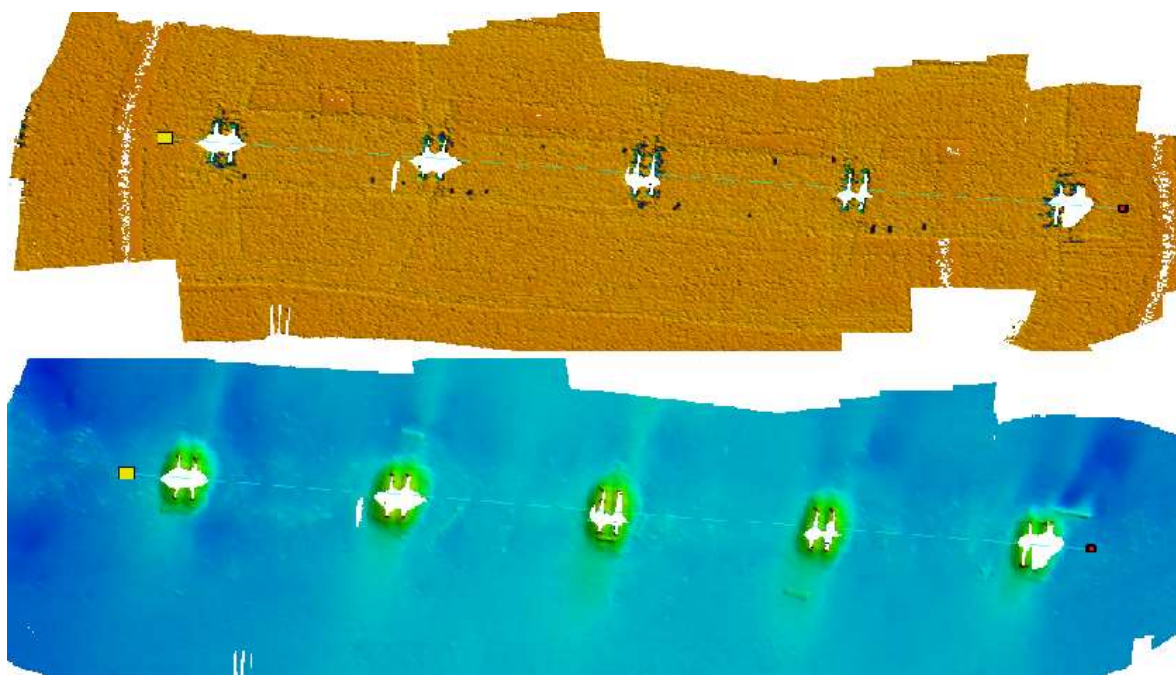


Figura 97 – Área do perfil 1. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação W-E).

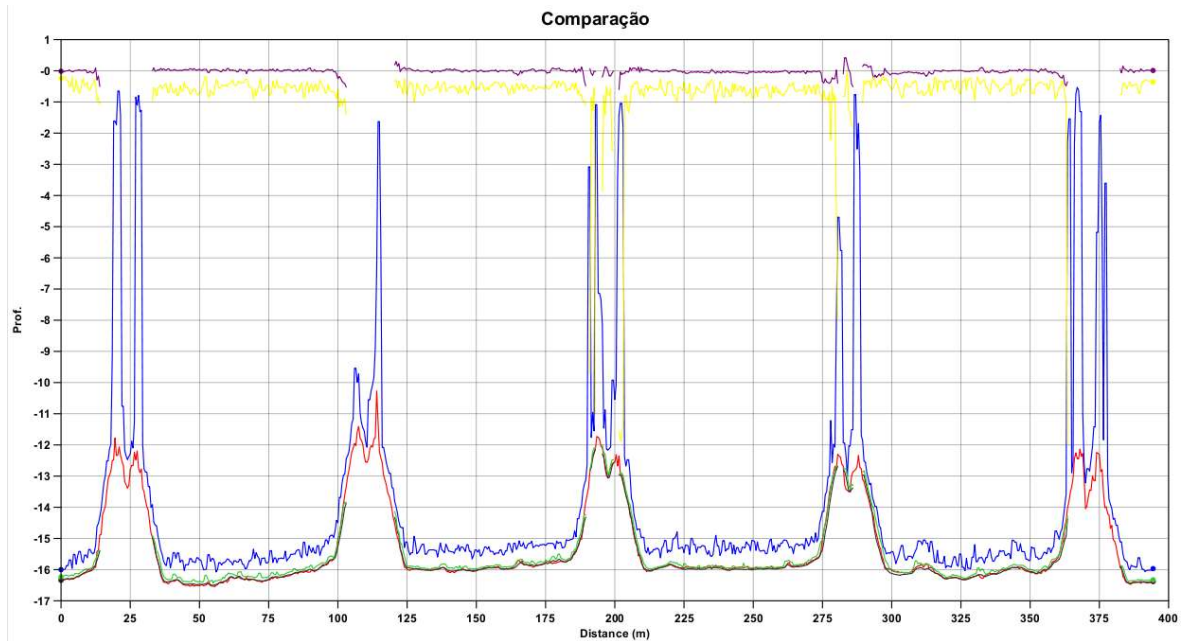


Figura 98 – Perfil 1 (orientação W-E). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

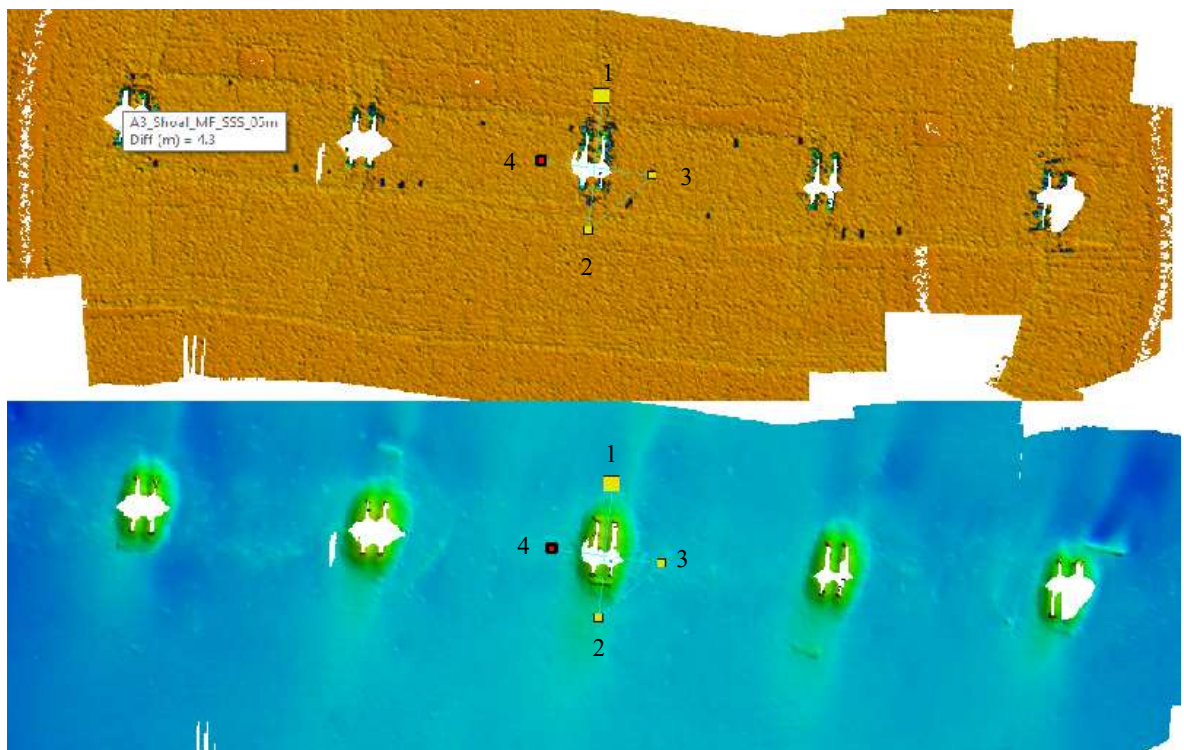


Figura 99 – Área perfil 2. Aqui, foi feito um perfil em forma de cruz representados pelos pontos 1, 2, 3 e 4. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação 1 à 2 N-S, 2 à 3 SW-NE e 3 à 4 E-W).

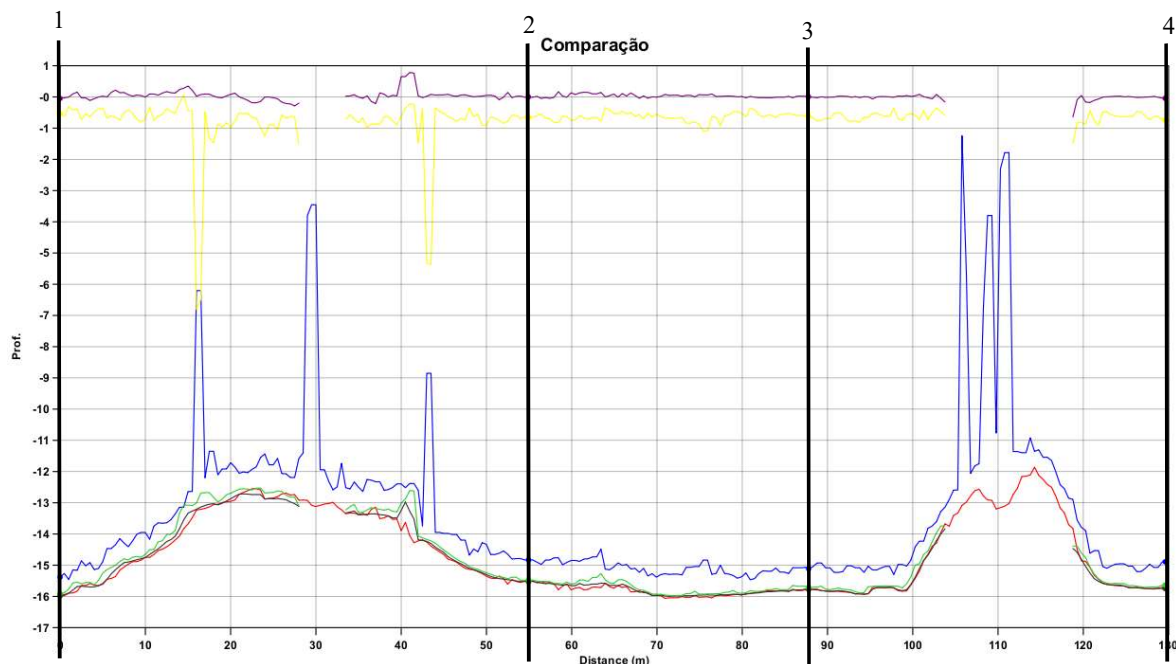


Figura 100 – Perfil 2 (orientação 1 à 2 N-S, 2 à 3 SW-NE e 3 à 4 E-W). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

Esse teste foi designado para poder ver até que ponto os sensores conseguem detectar feições que se prolongam verticalmente em relação ao plano do fundo marinho. Como o pilar é uma feição que começa no fundo e ultrapassa a superfície, o resultado ótimo para este teste seria a detecção da profundidade de valor 0 m. Isto visa simular um objeto naufragado cuja projeção pode vir a causar sérios riscos à navegação.

O que se pode ver a partir da Figura 97 à Figura 100, é que os perfis das camadas *Depth* e da camada *Shoal* do multifeixe se alinham. Contudo, a camada *Shoal* do interferométrico difere bastante. Primeiramente, ela mantém uma diferença média na ordem de 0,5 m em áreas planas ou de pouco gradiente, em consonância com o que foi visto nas outras áreas. Entretanto, nas áreas dos pilares das pontes, esta mesma camada é capaz de detectar feições de 0,5 m de profundidade, enquanto que, nesses mesmos locais, o multifeixe não tem nenhuma solução de profundidade³⁵.

Assim, é visível que o sonar de varredura lateral interferométrico é capaz de imagear e detectar feições com grande projeção vertical, enquanto que o multifeixe cede a esta limitação.

³⁵ Cabe ressaltar que o resultado poderia ser diferente caso o MBES passasse exatamente em cima da feição (situação a ser vista na próxima área). O que se quis verificar aqui foi a capacidade de detecção com os feixes laterais, simulando uma área onde a embarcação, devido à profundidade, não possa navegar.

Tal fato é explicado pela geometria do feixe. Enquanto que a abertura angular do feixe do MBES é de 60° para cada bordo, podendo chegar a 75°, o PDBS alcança 80° a 90°, o que lhe permite um imageamento mais amplo.

4.3.4 Conclusão área 3

A partir do que foi visualizado acima, pode-se concluir que:

- 1 – São mantidas as mesmas conclusões 1 a 5 da área 1;
- 2 – Com relação à acurácia, foi observado um desvio entre as camadas *Depth* de 0 m, o que indica que o interpolador CUBE foi capaz de estimar profundidades muito semelhantes a partir dos dados coletados por ambos os sensores. Da mesma forma, as alegações para o item 5 da conclusão da área 1 também se fazem pertinentes aqui. Contudo, diferentemente das áreas anteriores, o *gap* do nadir se faz proeminente nesta área. Esta ocorrência se deve à não superposição de dados, pois como se navegava em águas muito restritas, não havia como fazer linhas adjacentes que pudessem cobrir os *gaps*.
- 3 – Além das mesmas análises do item 6 da área 1 (com exceção que a média da diferença entre as camadas *Shoal* é de 0,5 m), é importante notar que as feições-alvos devem ser analisadas mais pormenorizadamente, a seguir.
- 4 – No que tange aos pilares da ponte, a camada *Depth* do interferométrico não foi capaz de calculá-las. Tal fato se deve ao algoritmo do CUBE baseado em hipóteses, e em seu critério de desambiguidade, não considerou a detecção dos pilares das pontes como sendo hipóteses viáveis (durante o processamento isto poderia ser corrigido e estas hipóteses poderiam ser consideradas como as corretas). Entretanto, os pilares foram imageados e quantificados³⁶ por este sensor e os dados considerados válidos foram armazenados na camada *Shoal*. A performance do PDBS frente ao MBES, no tocante ao imageamento e quantificação de feições com grande projeção vertical, tem sua causa na geometria dos feixes.
- 5 – Esta área foi designada para verificar a capacidade dos sensores de identificar feições que se projetam verticalmente. Nesse quesito, o sensor interferométrico alcançou resultados mais

³⁶ Neste trabalho, é importante se estabelecer uma diferença entre imagear e quantificar. Imagear, nesta dissertação, significa obter ecos dos alvos. Quantificar é que esses ecos tenham uma intensidade e geometria (por geometria, considerar a contiguidade de outros dados considerados válidos) suficientes para que durante o processamento dos dados, possam ser considerados válidos.

condizentes com a realidade do que o multifeixe. Entretanto demonstrou uma desvantagem grande quando se navegando em áreas em que só seja possível navegar em locais estreitos de modo a não poder dispor de 2 linhas adjacentes e espaçadas a uma distância capaz de cobrir o *gap* do nadir. Da mesma forma da área 1, o uso do sensor tem que ser visto caso a caso, dependendo do custo benefício de cada situação.

4.4 ÁREA 4 – TESTE DE DETECÇÃO DE OBJETOS NAUFRAGADOS

As principais características, de acordo com a Tabela 12, dessa área (Figura 101 e Figura 102) são:

Tabela 12 – Dados informativos da área 4 (azul), relativos à precisão (rosa) e relativos à acurácia (coral).

Parâmetros	Kongsberg EM 2040	Hydroacoustic Geoswath 4R
Comprimento (dimensão considerada no sentido das linhas) (~m)	500	500
Largura (dimensão considerada no sentido transversal às linhas) (~m)	370	290
Área sondada (~km ²)	0,2	0,1
Quantidade de linhas	16	12
Distância entre linhas (~m)	25	25
Direção das linhas (~°)	45 – 225 e 125 – 305	45 – 225 e 125 – 305
Velocidade de sondagem (m/s)	2,8	2,8
Resolução da superfície (m)	0,5	0,5
Quantidade de células	789.254	744.743
Incerteza média da hipótese (m)	0,1	0,2
Inclusão Ordem Especial – Eq. 2	100% dos nós	100% dos nós
Desvio padrão médio do nó (m)	0	0,2
Inclusão Ordem Especial (baseado na incerteza amostral do nó – Eq. 4)	99,3%	21,8%
Densidade (média da quantidade de <i>pings</i> que contribuíram para 1 nó)	35,2	157,7
QC Report		Ordem Especial
Depth_{MBES} - Depth_{PDBS}		$\mu = 0$ m, MÍN = -6,4 m e MAX = 6,9 m
Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}		$\mu = 0,6$ m, MÍN = -5,5 m e MAX = 7,5 m

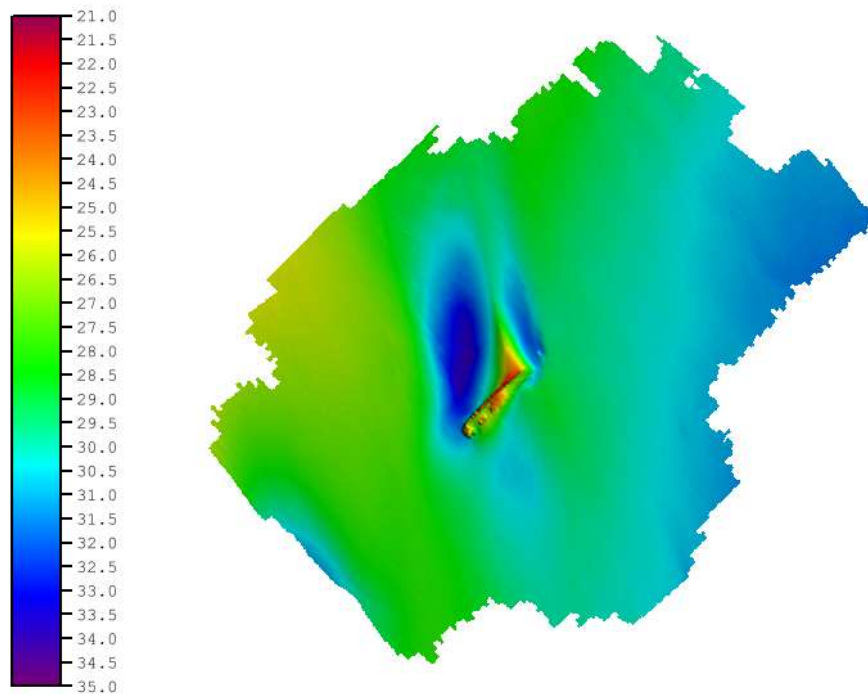


Figura 101 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade (camada Depth) do MBES. Escala em metros.

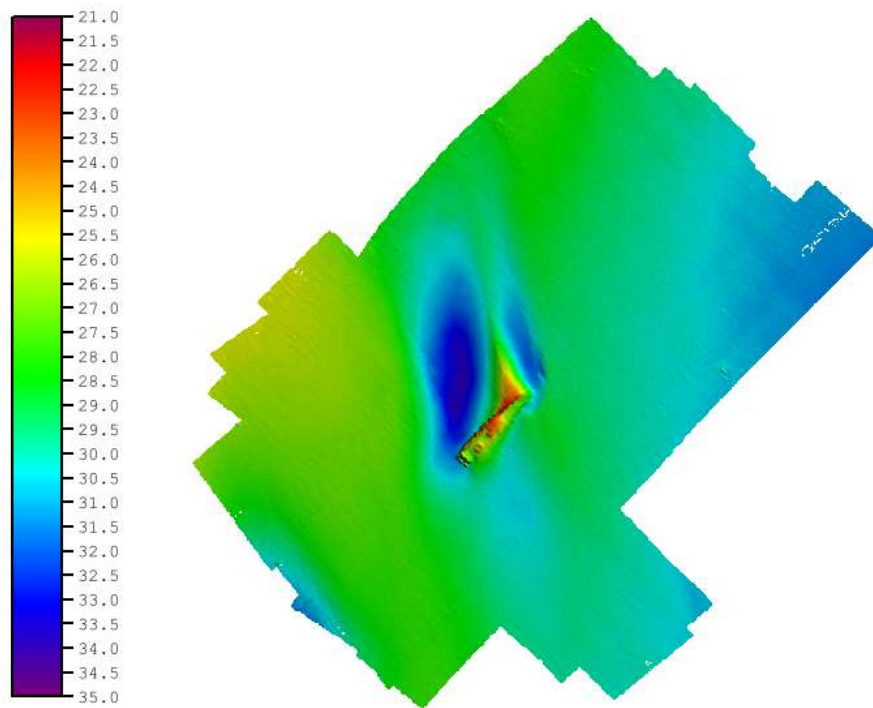


Figura 102 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade (camada Depth) do PDBS. Escala em metros.

4.4.1 *Precisão*

A superfície gerada pelo MBES teve como incerteza média da hipótese 0,1 m e o desvio padrão médio do nó 0 m, em um total de 789.254 células analisadas, com aproximadamente 35,2 *pings* por nó. Os cálculos de incerteza da hipótese e da incerteza amostral do nó, quando subtraídos do intervalo de tolerância da ordem especial, apresentaram valores negativos (100% e 99,3% respectivamente), mostrando que foi possível alcançar Ordem Especial.

A superfície gerada pelo PDBS teve a incerteza média da hipótese de 0,2 m e o desvio padrão médio do nó de 0,2 m, em 744.743 células analisadas, com uma média de 157,7 *pings* por nó. A incerteza da hipótese frente à ordem especial foi 100% negativo e a incerteza do nó de 21,8% de resultados negativos.

Nota-se que, em divergência às outras áreas, o número de células analisadas do interferométrico foi menor do que a quantidade das células do multifeixe. A explicação é que foram necessárias menos linhas com o interferométrico para realizar o imageamento do alvo a contento, o que acarretou menor número de células por ocasião da criação da superfície.

A IVT (Figura 103) e as imagens do *subset editor* (Figura 104 à Figura 107) seguem o mesmo padrão observado nas áreas anteriores, dispensando maiores considerações além das já realizadas.

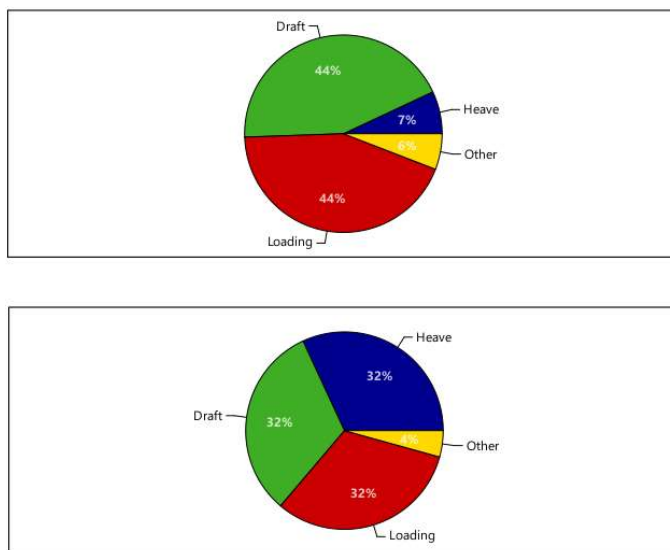


Figura 103 – Gráfico demonstrando as fontes de incerteza de cada sensor para a área 4. O gráfico de cima corresponde ao MBES, enquanto o de baixo ao PDBS.

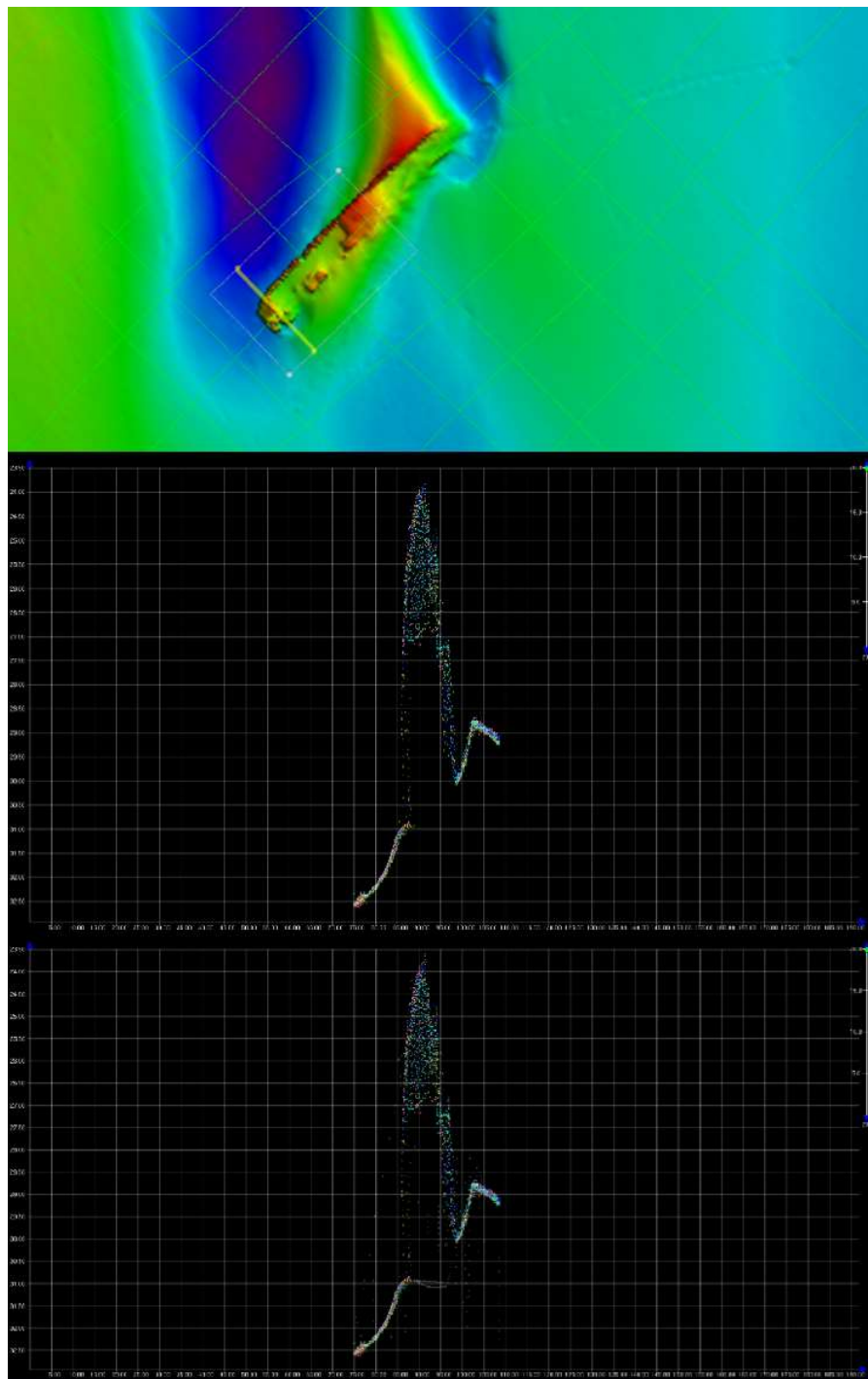


Figura 104 – Popa do casco soçobrado na sondagem com o MBES. Área observada por meio do subset editor. O primeiro quadro é o setor em que foi realizado o perfil. O perfil visualizado nos quadros abaixo está dentro da tarjeta amarela, que tem espessura de 1 m. A visão é de ré, o que significa que os dois últimos quadros mostram todos os pings dentro da faixa amarela como se o visualizador estivesse no ponto mais baixo da figura. As cores diferentes de cada perfil significam que pertencem a linhas de sondagens diferentes. O exagero vertical está em 20 vezes. O segundo quadro mostra o perfil com os dados considerados válidos. O terceiro mostra com os dados rejeitados. Esta mesma diagramação será usada para todas as figuras do que contenham imagens do subset editor.

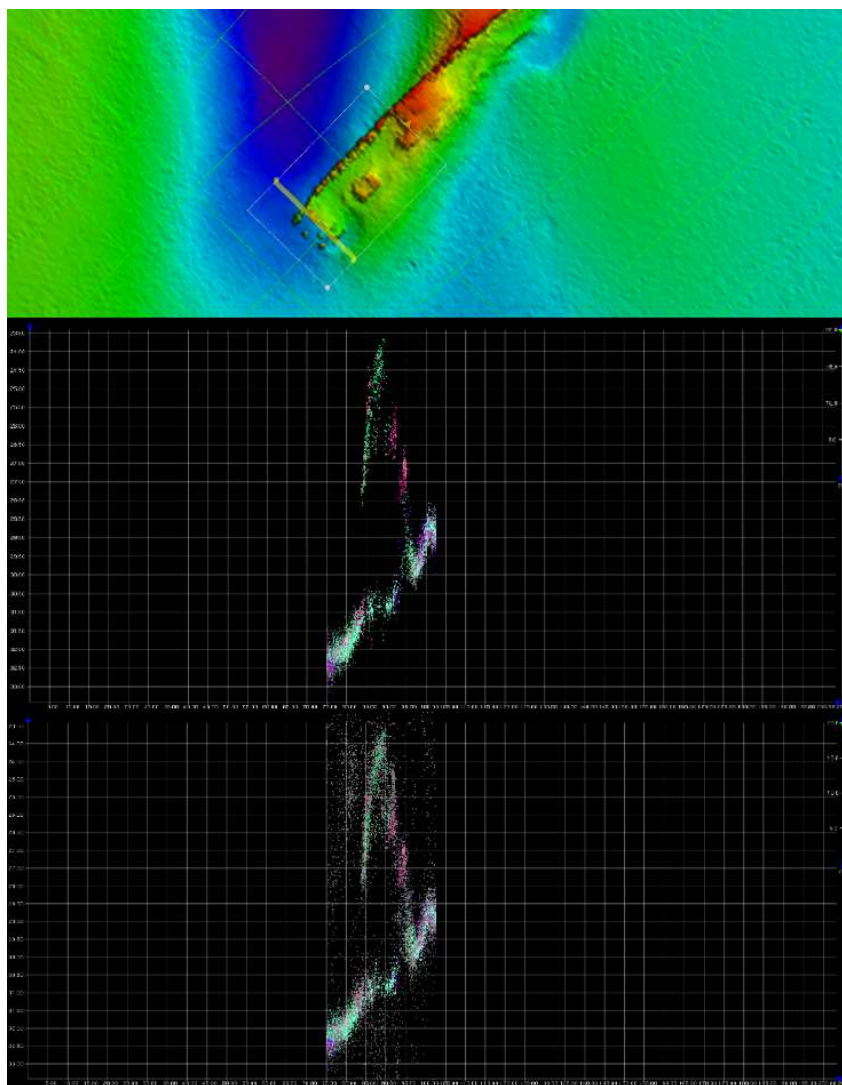


Figura 105 – Mesma área da figura anterior com sondagem PDBS. Os pontos em cinza representam as profundidades que não foram consideradas válidas.

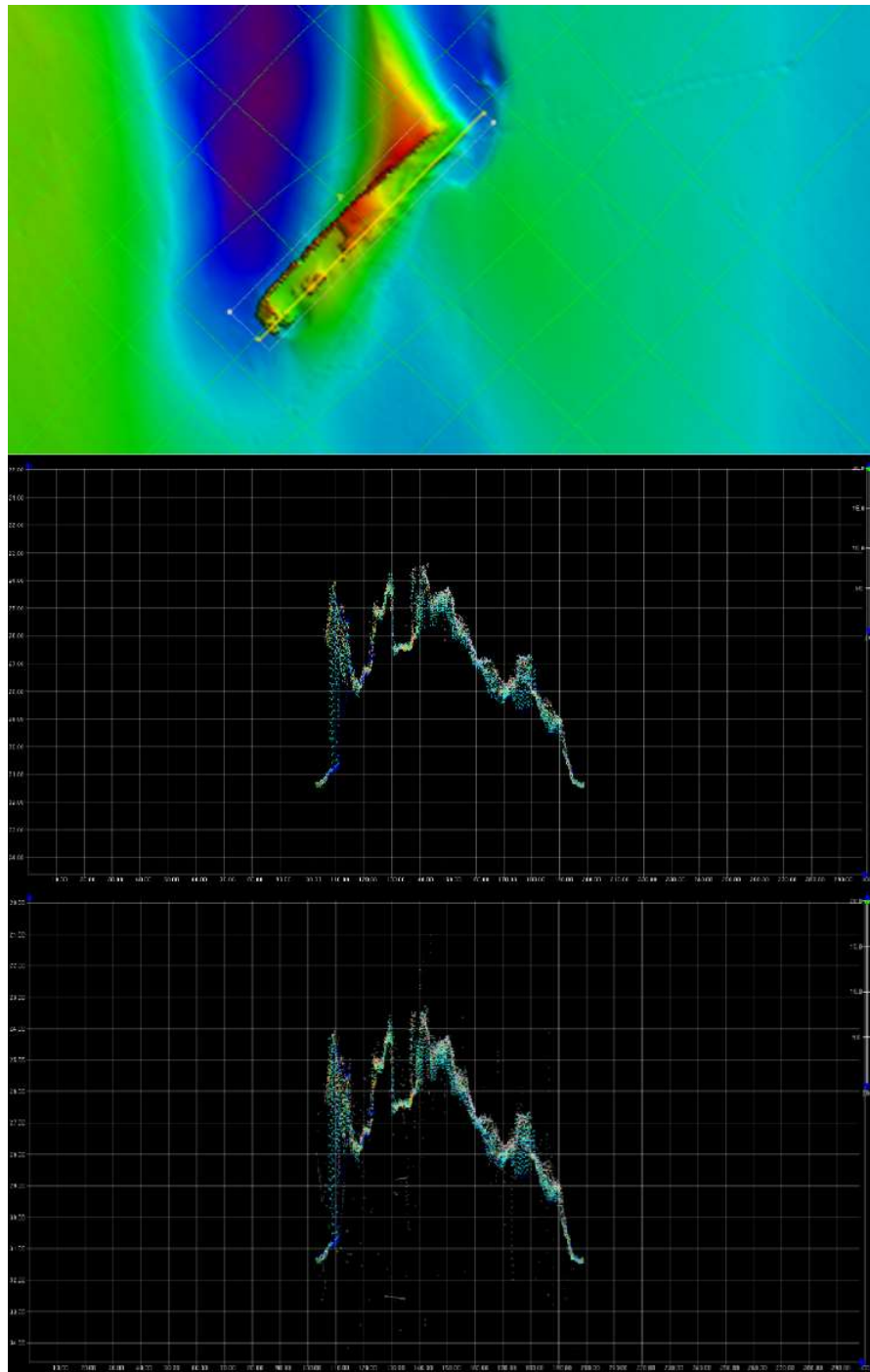


Figura 106 – Perfil longitudinal do casco, na sondagem multifeixe.

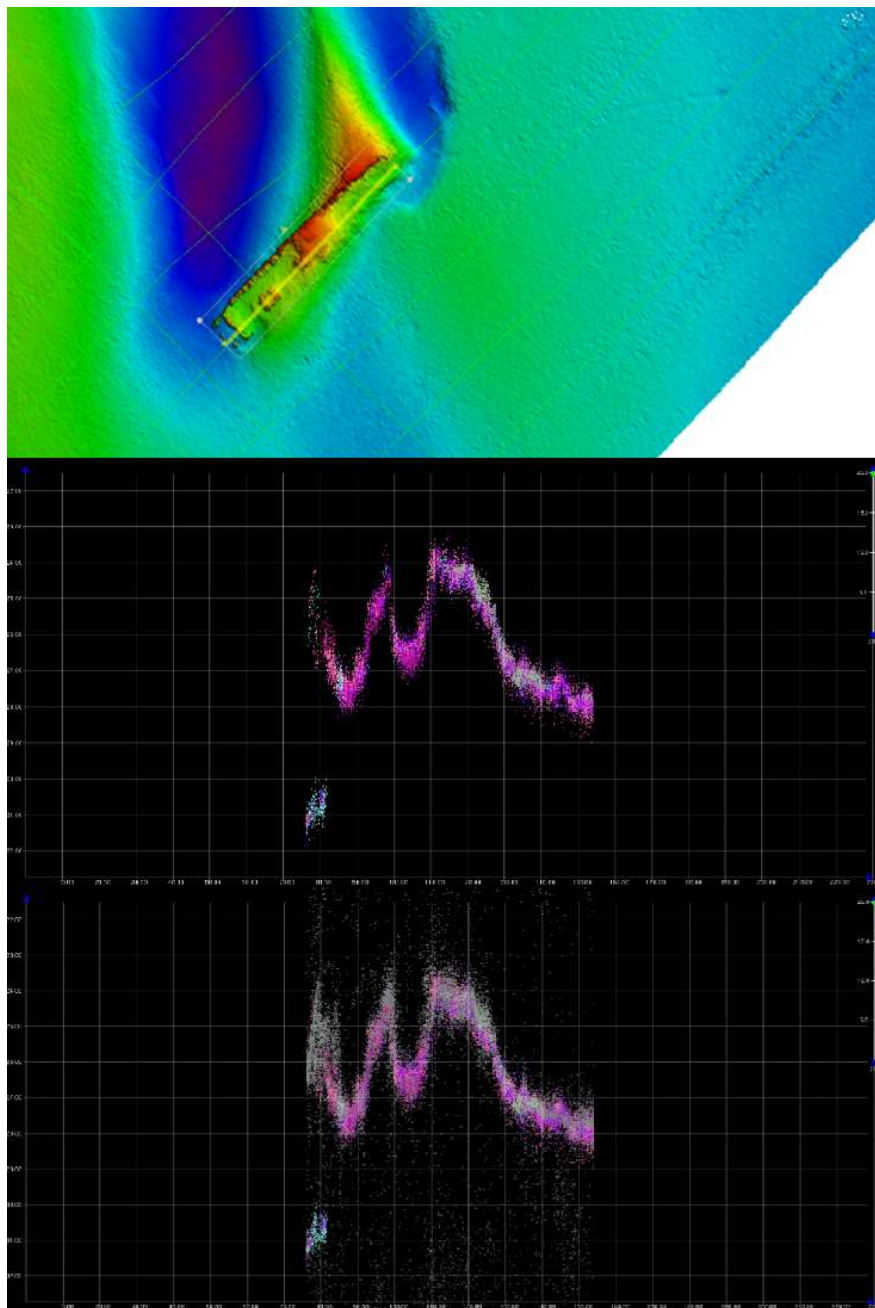


Figura 107 – Mesmo setor, na sondagem com o interferométrico.

Como nessa área se estuda também um alvo, porém com particularidades diferentes da área 1, cabem as mesmas observações (Figura 108 e Figura 109), restando ainda avaliar se a superfície poderia ser considerada da Ordem 1a (Figura 110).

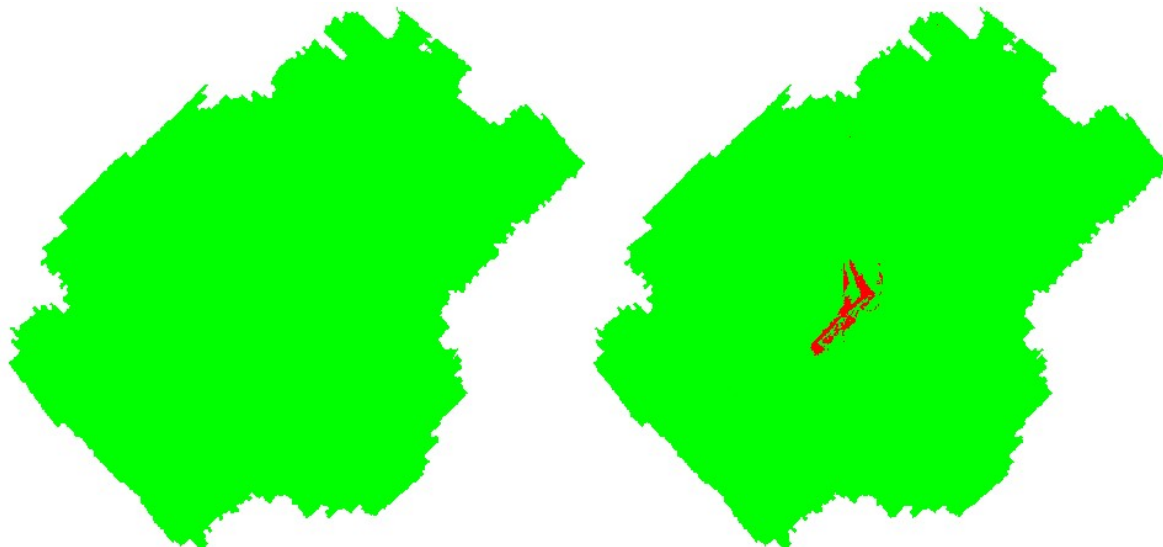


Figura 108 – Camadas de superfícies da área 4 criadas a partir das equações 3 e 5. A da esquerda é representativa da incerteza da hipótese. A da direita é representativa da incerteza amostral do nó. Ambas são relativas ao ecobatímetro multifeixe. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem Especial, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

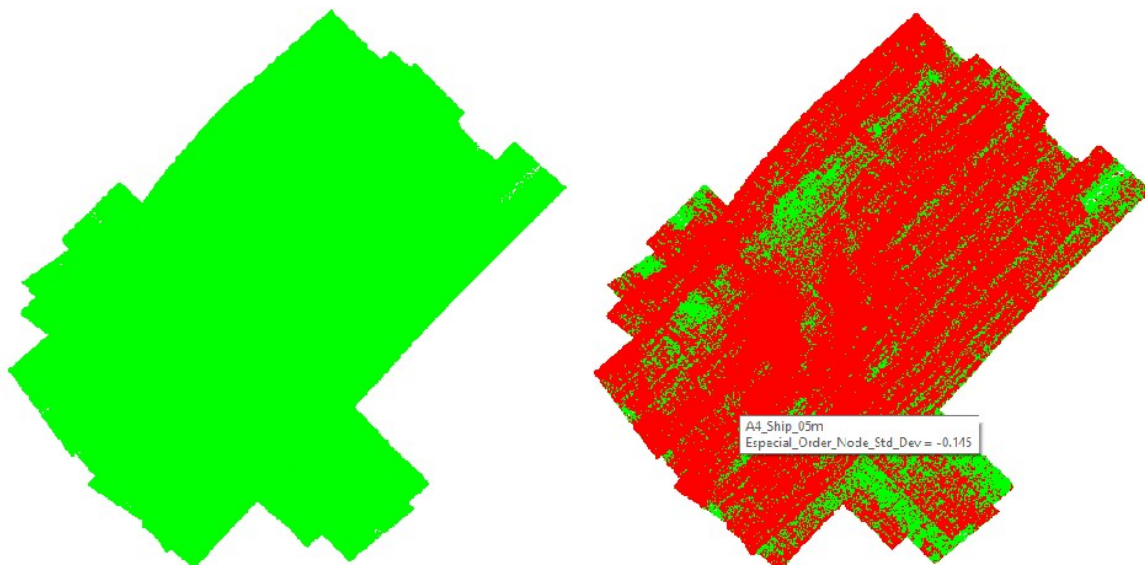


Figura 109 – Camadas de superfícies da área 4 criadas a partir das equações 3 e 5. A da esquerda é representativa da incerteza da hipótese. A da direita é representativa da incerteza amostral do nó. Ambas são relativas ao sonar de varredura lateral interferométrico. Em verde estão todos os nós cujos valores foram negativos, ou seja, alcançaram a Ordem Especial, enquanto que em vermelho estão representados os valores positivos.

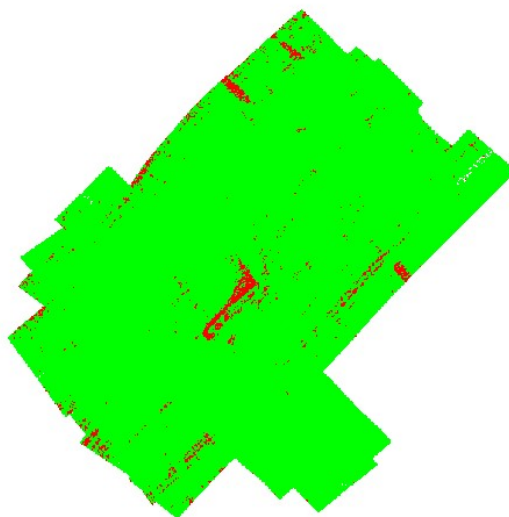


Figura 110 – Camada de superfície resultante da equação 6, mostrando que os resultados se enquadram dentro da Ordem 1a. Em vermelho estão os nós cujas incertezas amostrais ficaram fora do intervalo preconizado para Ordem 1a. Em verde estão os nós que tiveram suas incertezas dentro do preconizado para esta ordem.

O cenário muda bastante quando se refere à Ordem 1a, com 97,9% dos nós tendo sua incerteza amostral dentro da tolerância da OHI.

4.4.2 Acurácia

A ferramenta *QC Report* mostrou que todos os feixes ficaram acima de 95% para Ordem Especial. A diferença média da camada *Depth* (Figura 111) das duas superfícies foi de 0 m, com um mínimo de -6,4 m e um máximo de 6,9 m. Na camada *Shoal* (Figura 112), a média foi de 0,6 m, com um mínimo de -5,5 m e um máximo de 7,5 m.

Da mesma forma que na área 3, devido à área ser majoritariamente plana, a diferença das camadas *Depth* foi praticamente nenhuma. A diferença entre as camadas *Shoal* teve diferença de 0,6 m, como tem sido encontrado nas outras áreas. Além das considerações feitas para a área 1, observa-se grande variação entre os valores de mínimo e máximo que ocorrem sobre o casco soçobrado. A princípio, tais variações são situacionais e localizadas, de modo que esses valores podem vir a se diluir em uma seleção de sondagem,³⁷ dependendo da escala.

³⁷ Seleção de sondagem é a escolha de sondagens que sejam representativas de uma carta náutica. Quando se termina o processamento e o controle de qualidade de uma sondagem e esta é considerada apta a vir a compor a carta náutica, a camada *Shoal* é selecionada para a exportação. Entretanto, devido ao processamento e à análise terem sido feitas em cima de uma superfície de resolução de 0,5 m, cada 0,5 m do terreno terá uma profundidade

Como a área se apresenta bem homogênea fora do alvo, é interessante que o navio naufragado seja melhor observado através de perfis.

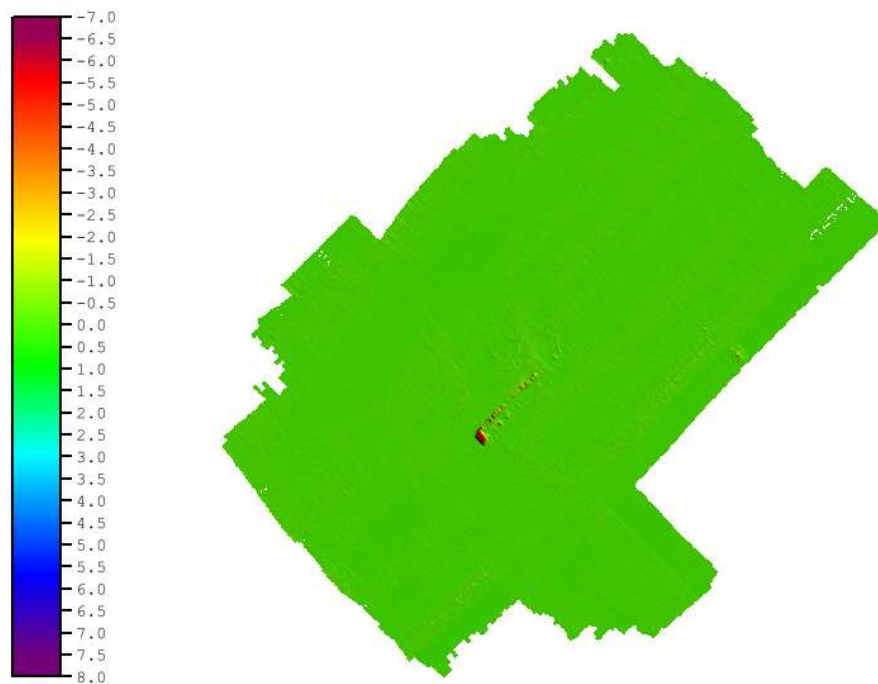


Figura 111 – Superfície diferença da camada Depth para a área 4. Escala em metros.

representativa. Essa quantidade de informações é praticamente impossível de ser reproduzida no mapa. Assim, serão escolhidas algumas sondagens da área original que venham a representar áreas bem maiores do que 0,5 m (a distância de espaçamento entre essas profundidades dependerá da escala da carta e pode variar segundo o critério de cada Serviço Hidrográfico). Dessa forma, as sondagens são escolhidas de modo que entre um triângulo formado por 3 informações batimétricas, não haja profundidades mais rasas. Utilizando este procedimento, essas diferenças entre máximos e mínimos, por serem muito pontuais, podem vir a sumir. É o mesmo raciocínio para absorção pela escala da carta.

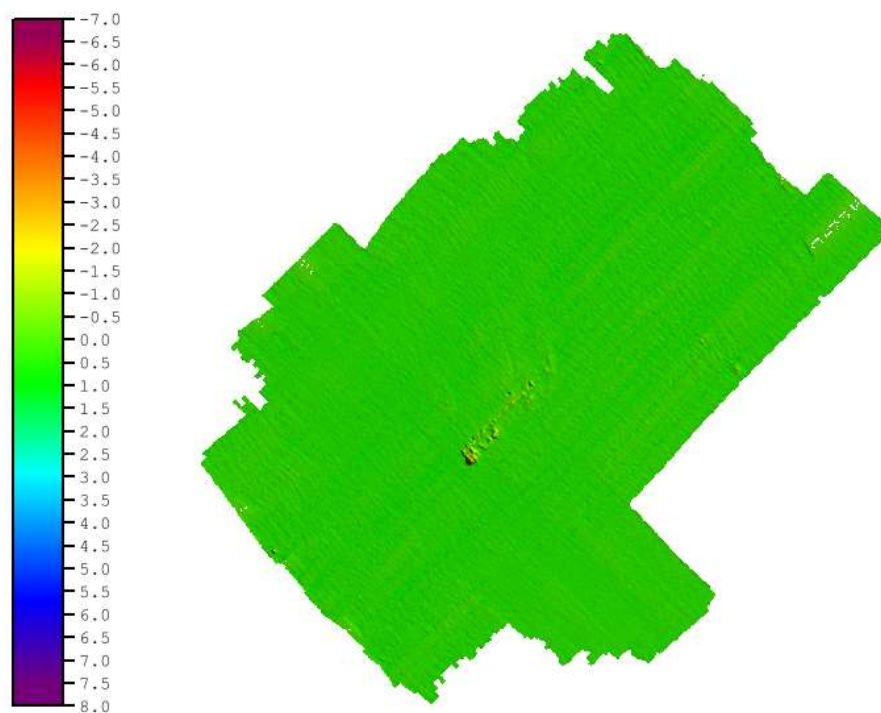


Figura 112 – Superfície diferença da camada Shoal para a área 4. Escala em metros.

4.4.3 Análise das feições-alvos – casco soçobrado

Os perfis (Figura 113 à Figura 118) ficaram concentrados nas áreas de maiores discrepâncias da superfície diferença das camadas *Shoal*.

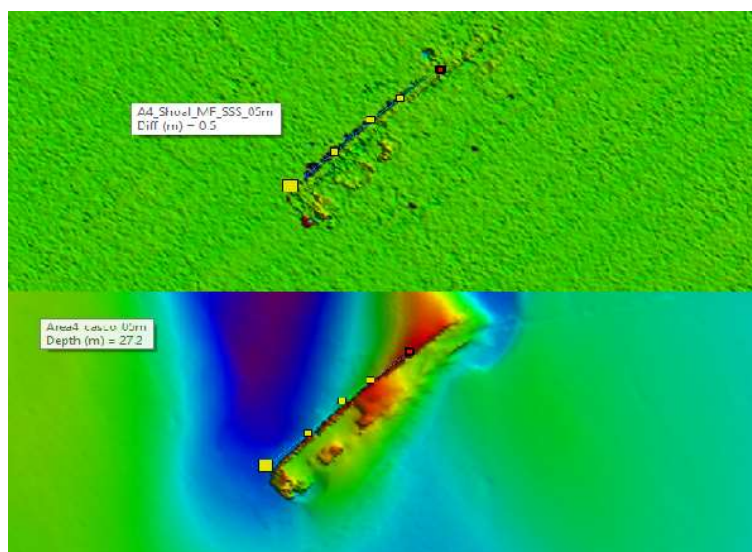


Figura 113 – Área do perfil 1. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação SW-NE).

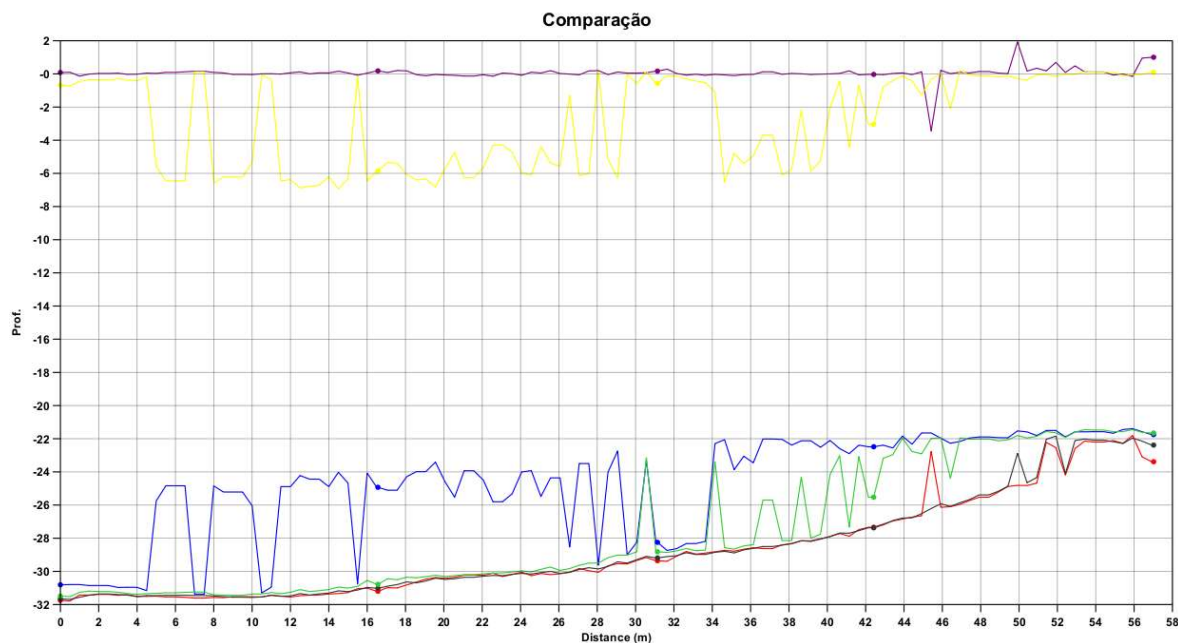


Figura 114 – Perfil 1 (orientação SW-NE). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

Disposto paralelamente ao casco do navio existe uma depressão, o que pode intensificar *layover*. Devido à grande diferença de profundidades, a superfície diferença apontou grandes variações nas profundidades mais rasas, provavelmente devido ao ruído causado pela embarcação (multicaminhamento e *layover*). Em uma análise de perfil, pode-se observar diferença de em média 6 m (eixo y) com o PDBS detectando profundidades mais rasas até a estabilização na distância de 46 m (eixo x) (Figura 114). Contudo, a camada *Shoal* do interferométrico sempre vem apontando as profundidades mais rasas.

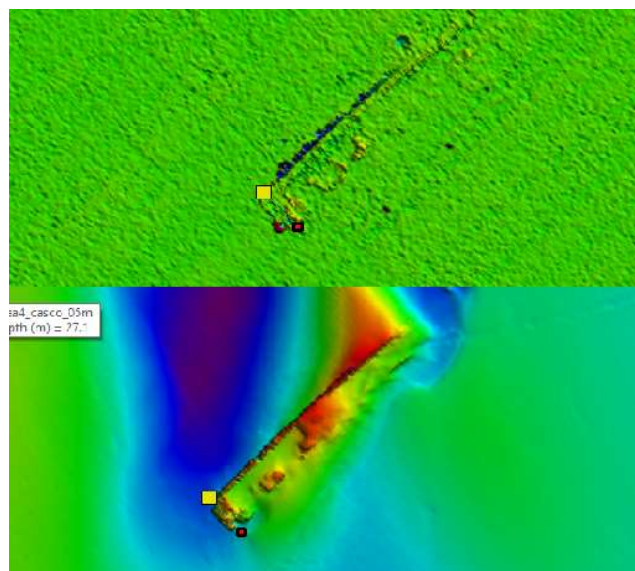


Figura 115 – Área do perfil 2. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação NW-SE).

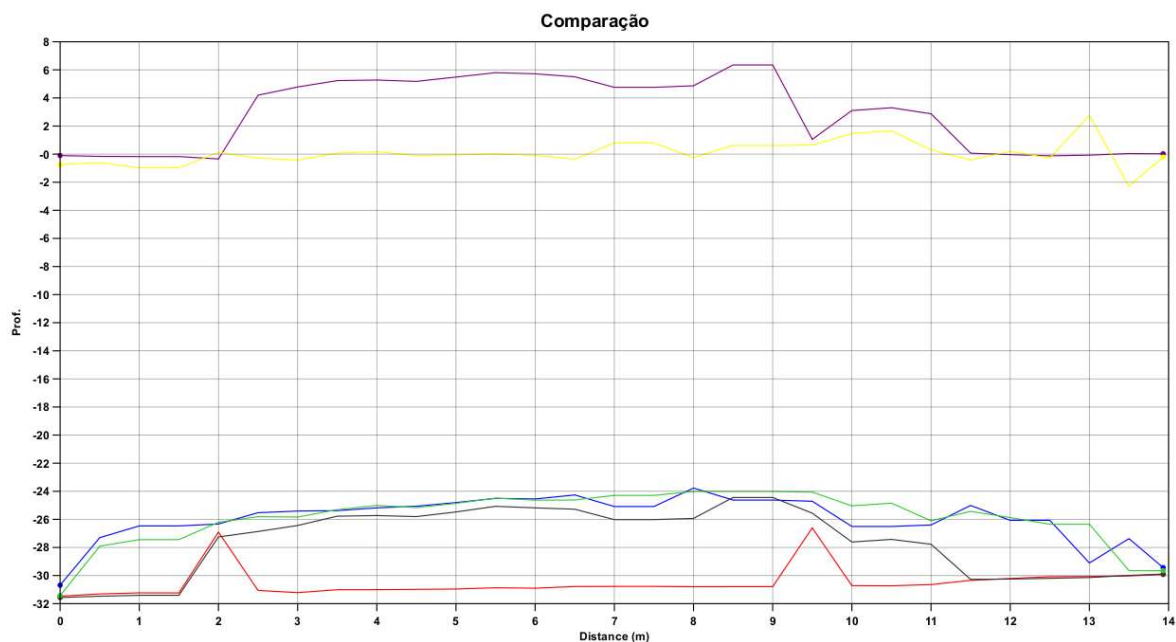


Figura 116 – Perfil 2 (orientação NW-SE). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

Em um perfil transversal (Figura 115 e Figura 116), observa-se uma equivalência de profundidades detectadas como as mais rasas, porém em alguns trechos pode-se perceber que o PDBS fornece profundidades menos rasas do que o MBES (principalmente na distância 13 m, que se observa uma diferença de aproximadamente 2 m), podendo vir a gerar um risco à

navegação em uma sondagem somente com o interferométrico. Tal fato explicaria os mínimos com maior valor na superfície diferença da camada *Shoal*. Contudo, como já mencionado acima, tal diferença, por ser situacional, pode ser absorvida pela seleção de sondagem ou escala da carta. Tal fato na detecção se repete também isoladamente em outros locais e se deve à quantidade de ruído que torna impossível de quantificar o que realmente é um alvo ou não (efeito *layover* – logo essas informações são descartadas durante o processamento).

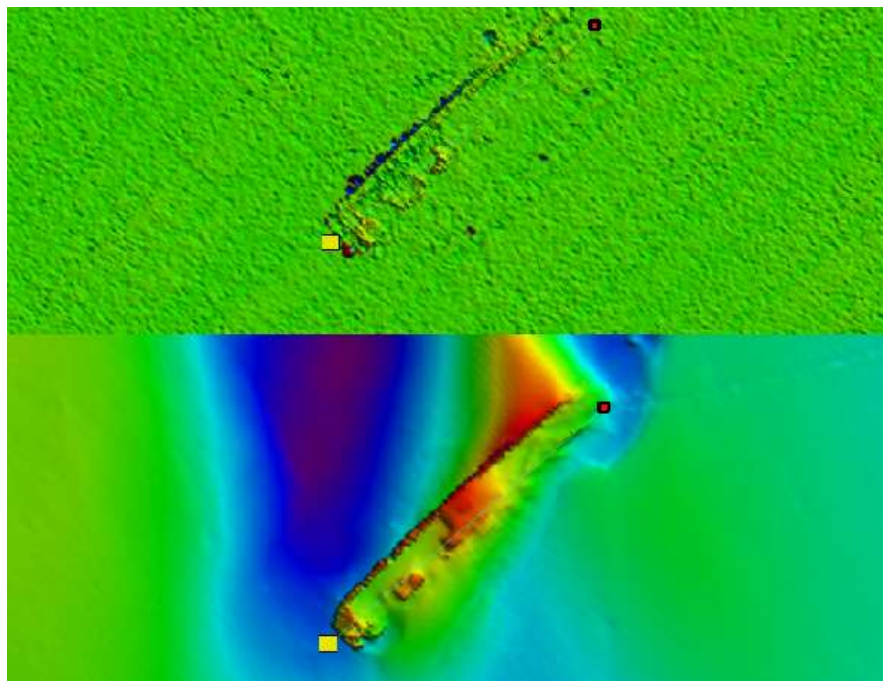


Figura 117 – Área perfil 3. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação SW-NE).

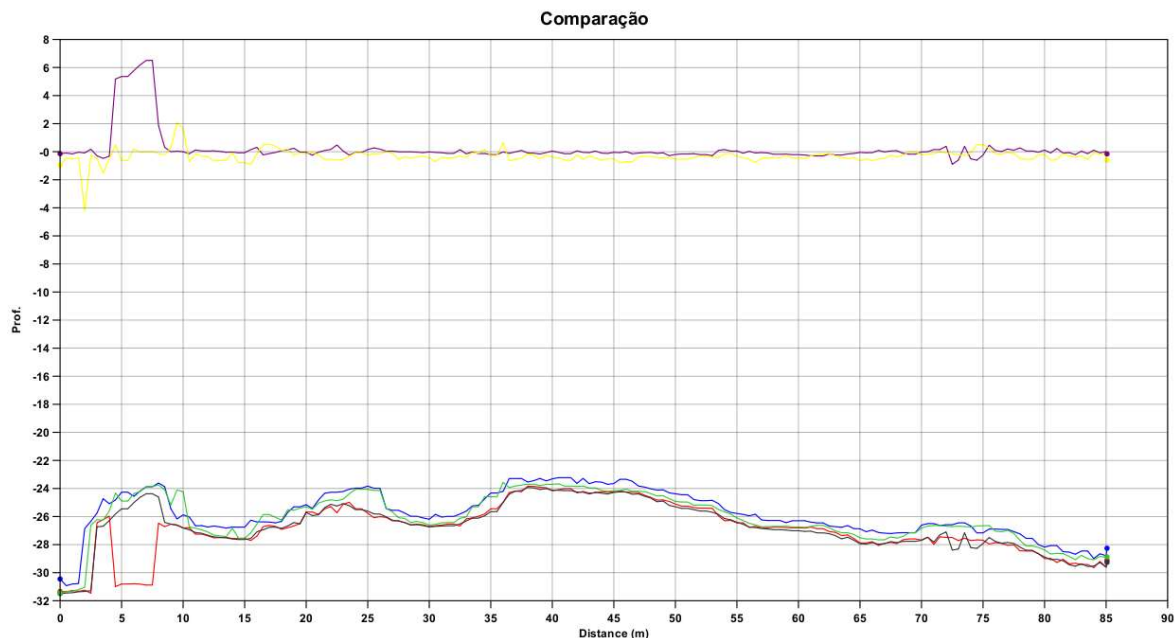


Figura 118 – Perfil 3 (orientação SW-NE). Os perfis são representativos das seguintes camadas e superfícies: camada Depth multifeixe – preto, camada Shoal multifeixe – verde, camada Depth interferométrico – vermelho, camada Shoal interferométrico – azul, superfície diferença camadas Depth – lilás e superfícies diferença camada Shoal – amarelo.

Neste perfil longitudinal pelo meio do navio (Figura 117 e Figura 118), pode-se observar as mesmas peculiaridades vistas nas áreas mais planas.

4.4.4 Conclusão área 4

A partir do que foi visualizado acima, pode-se concluir que:

- 1 – São mantidas as conclusões 1 a 5 da área 1;
- 2 – Na análise de acurácia, observou-se que a área em geral não difere praticamente nada quando vista sob a ótica dos dois sensores estudados. Valem aqui as considerações do item 6 da conclusão da área 1, com ressalva de que há uma mudança perceptível quando o alvo é analisado, a ser visto no item 4.
- 3 – As conclusões do item 7 da área 1 também se aplicam aqui, com adendo que a média de diferença entre as camadas *Shoal* foi de 0,6 m.
- 4 – Já na análise da feição-alvo, pode-se observar que houve grandes discrepâncias, com máximos e mínimos atingindo valores entre 5 e 6 metros. Apesar de as diferenças serem grandes

quando se trata de batimetria em águas rasas, deve-se ressaltar que estas diferenças são pontuais e na maioria das vezes será dissolvida na seleção de sondagem, o que dependerá do critério do serviço hidrográfico e da escala da carta. Uma solução seria que cada Serviço Hidrográfico tivesse uma escala dos documentos náuticos a serem atualizados na qual a partir daí se pode usar o PDBS.

5 – Pelos perfis, pode-se perceber que em alguns lugares, a informação da camada *Shoal* multifeixe é mais rasa do que sua correlata PDBS (tal fato pode ser visualizado através de um máximo alto). Isto se deve à quantidade de ruído captado pelo interferométrico durante sua aquisição. Devido ao eco de retorno ser fraco, muitas vezes a informação verdadeira é mascarada pelo ruído no efeito de *noiseness*. Assim, apesar de o alvo ter sido imageado, ele não é quantificado e transformado em informação batimétrica, sendo rejeitado como se fosse ruído.

6 – Interessante reparar que o efeito acima ocorre prioritariamente em regiões limites do alvo, em um fenômeno parecido com o que houve nas bordas das rochas da área 1. Ou seja, aqui se pode observar *layover* também. Outro efeito observável é o de multicaminhamento, uma vez que o eco de retorno, nessas áreas limites, podem fazer caminhos diferentes que não sejam sensor – alvo – sensor.

7 – No restante do alvo, salvo as bordas, observa-se o mesmo fenômeno que em áreas planas ou de baixo gradiente, no qual a batimetria adquirida com o PDBS se mostra mais rasa do que a adquirida com o MBES.

4.5 ÁREA 5 – TESTE DE EFICIÊNCIA

As principais características (Tabela 13) da área 5 (Figura 119) são:

Tabela 13 – Dados informativos da área 5 (azul).

Parâmetros	Kongsberg EM 2040	Hydroacoustic Geoswath 4R
Comprimento (dimensão considerada no sentido das linhas) (~m)	1.740	1.740
Largura (dimensão considerada no sentido transversal às linhas) (~m)	800	760
Área sondada (~km²)	1,4	1,4
Quantidade de linhas	16	15 ³⁸
Distância entre linhas (~m)	50	50
Direção das linhas (~°)	000 – 180	000 – 180
Velocidade de sondagem (m/s)	2,7	2,7
Resolução da superfície (m)	0,5	0,5
Quantidade de células	4.040.082	6.110.066

Na área 5, foi verificada a eficiência do PDBS frente ao MBES. Este teste prescinde as informações de precisão e acurácia, visto que não estão no escopo do mesmo.

O teste de eficiência visa comparar o tempo de sondagem para uma mesma área ou a área útil sondada em um determinado tempo. Neste trabalho, optou-se pela segunda verificação. Pela Figura 119 pode-se verificar como foi a cobertura de sondagem.

³⁸ A última linha performada pelo sonar de varredura lateral interferométrico teve que ser descartada por ter poucos dados aproveitados. Em uma sondagem regular tal ocorrência é comum e o procedimento é refazer a linha. Por isso a importância de um rigoroso controle de qualidade ainda no campo. Tal procedimento não pode ser seguido, pois estava previsto entrada de mal tempo e a lancha CEHILI tinha um prazo para retorno ao NPqHo Vital de Oliveira que impossibilitava refazer a linha.

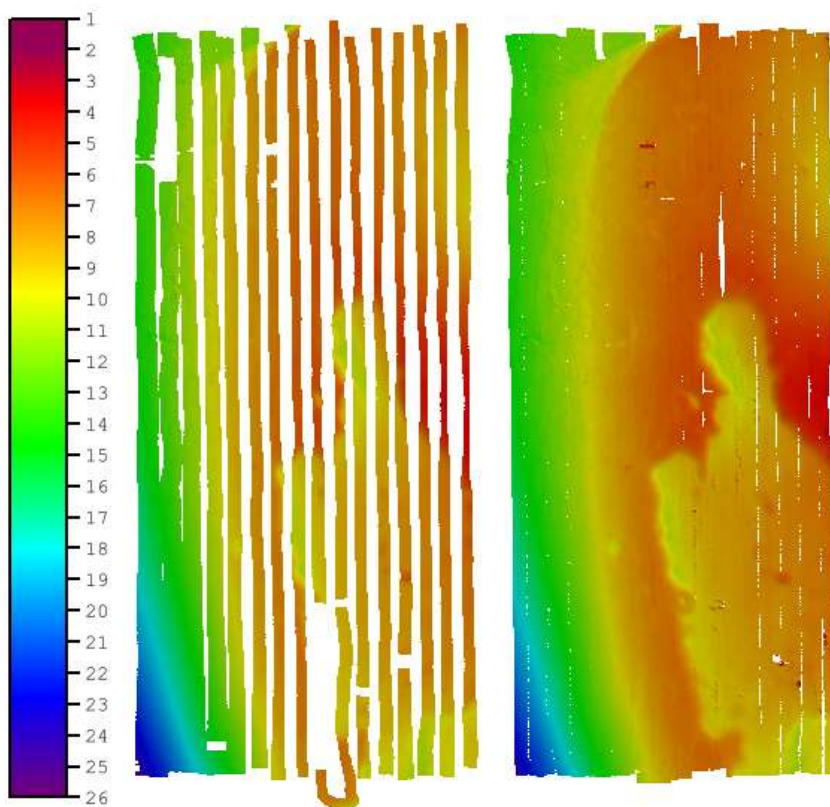


Figura 119 – Superfície CUBE na resolução de 0,5 m contendo as informações de profundidade (camada Depth). A superfície da esquerda foi criada a partir da sondagem com o MBES e a da direita com o PDBS. Escala em metros.

A superfície derivada dos dados multifeixe tem como profundidade mínima 3,4 m e máxima 25,2 m, enquanto que a derivada dos dados interferométrico tem como profundidade mínima 2,0 m e máxima 24,4 m. Tal diferença é explicada por, além da abertura angular do feixe, uma pequena variação nos momentos de início e fim de gravação das linhas.

Nessa área, as linhas foram planejadas tendo-se em conta o PDBS sem superposição com as linhas espaçadas de 50 metros³⁹. Sabe-se que a cobertura de ambos os sensores varia de acordo com a profundidade, logo uma análise por classes seria mais didática e analítica. Portanto, este trabalho dividirá as análises de eficiência em três faixas: de 25,2 m a 15 m, de 15 m a 5 m, de 5 m a 2 m (Figura 120).

³⁹ Como era de se esperar, na parte mais funda houve maior superposição dos feixes de linhas adjacentes, enquanto que para as áreas mais rasas, a superposição foi menor. Durante a aquisição, houve um monitoramento constante da cobertura do fundo para se alcançar pelo menos 100% de ensonificação, sendo os intervalos de valores batimétricos encontrados na parte mais a leste da área devido à retirada de dados espúrios durante o processamento.

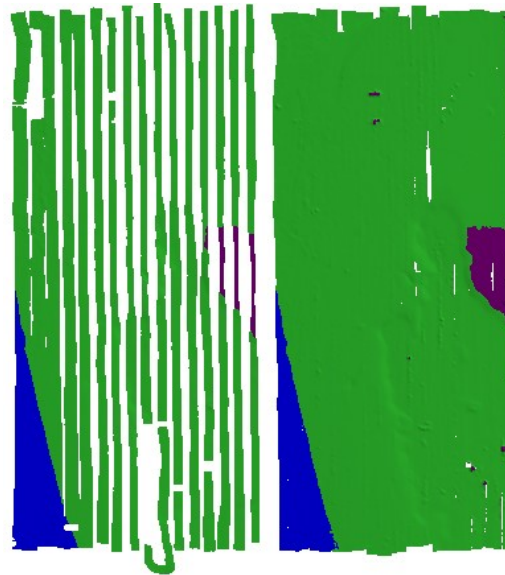


Figura 120 – Camadas Depth das superfícies MBES (esq.) e PDBS (dir.). Elas estão divididas em 3 faixas de profundidades: 25,2 m à 15 m (azul), 15 m à 5 m (verde) e 5 m à 2 m (lilás).

4.5.1 Primeira faixa – 25,2 m à 15 m

Nesta faixa de profundidade é visível que o perfil das linhas do *sidescan sonar* interferométrico não apresenta soluções de continuidade enquanto que o multifeixe sim (Figura 121 à Figura 125). Isso se deve ao *nadir gap*, pois uma vez que não haja superposição, a posição nadiral não pode ser coberta.

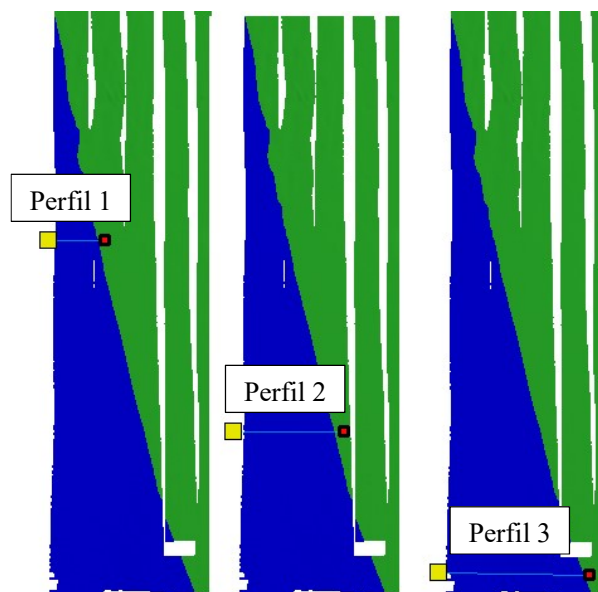


Figura 121 – Setores dos perfis, respectivamente da esquerda para a direita, representado na camada Depth da superfície MBES. Os pontos amarelos indicam os inícios e os vermelhos os fins de cada perfil (orientação W-E).

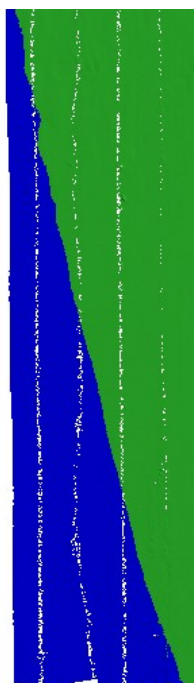


Figura 122 – Camada Depth da superfície PDBS. Nesta figura são bem visíveis os gaps no nadir.

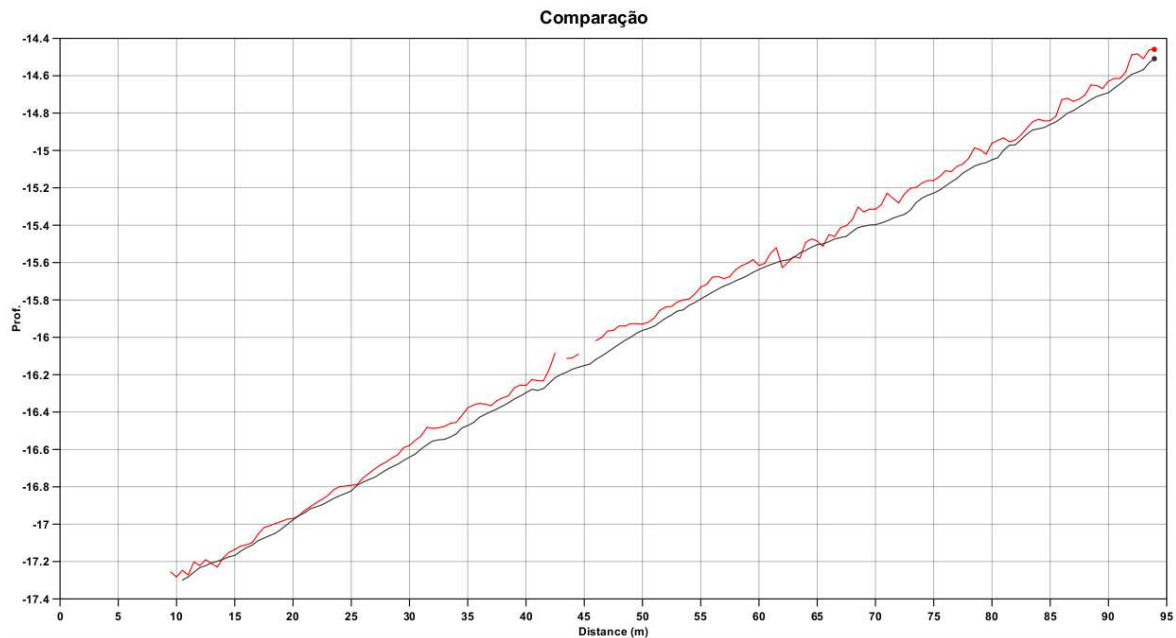


Figura 123 – Perfil 1 (orientação W-E). O perfil da camada Depth da superfície MBES está em preto e o da camada Depth da superfície PDBS está em vermelho.

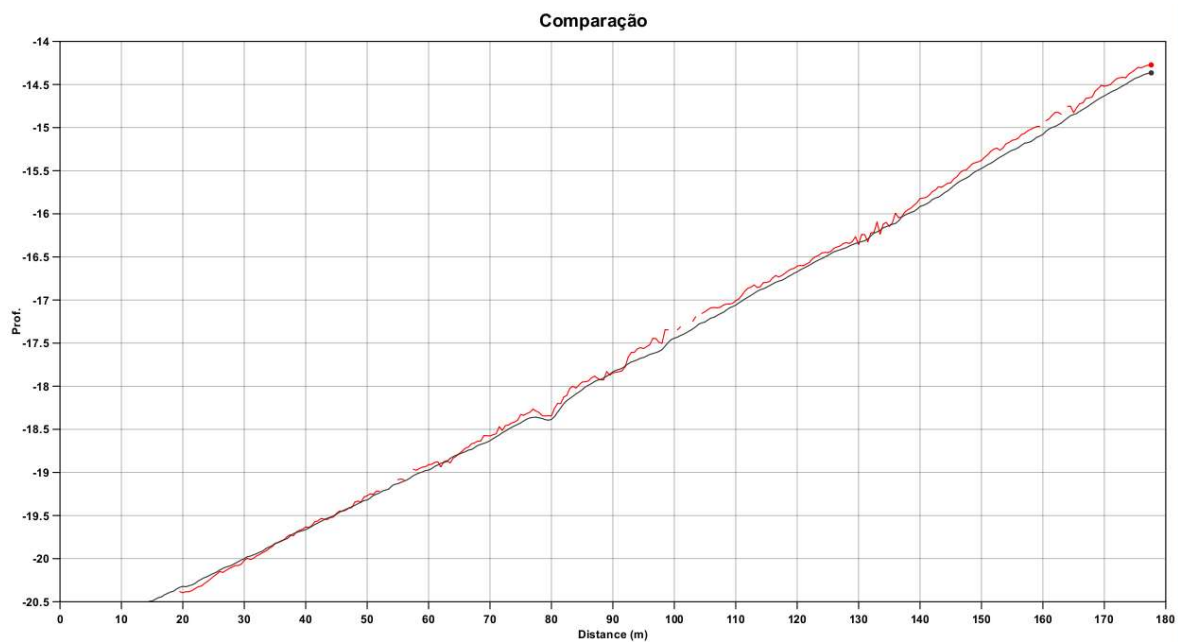


Figura 124 – Perfil 2 (orientação W-E). O perfil da camada Depth da superfície MBES está em preto e o da camada Depth da superfície PDBS está em vermelho.

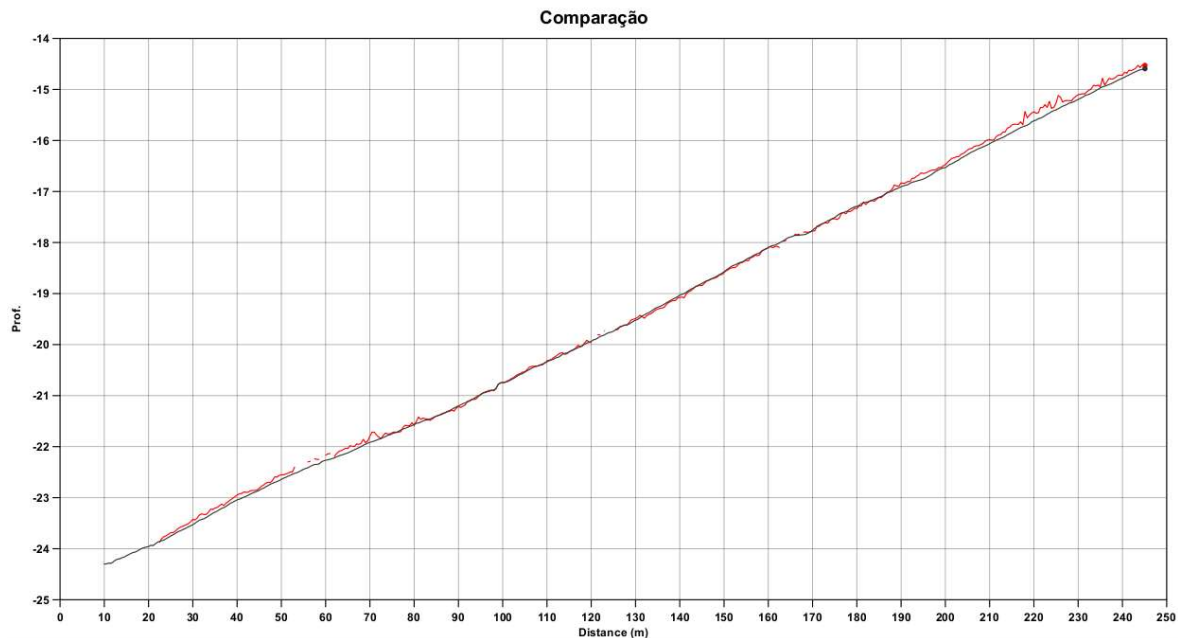


Figura 125 – Perfil 3 (orientação W-E). O perfil da camada Depth da superfície MBES está em preto e o da camada Depth da superfície PDBS está em vermelho.

4.5.2 Segunda faixa – 15 m à 5 m

Esses perfis, já em área de menor profundidade, mostram o inverso da primeira faixa (Figura 126 à Figura 130). Enquanto os perfis do interferométrico apresentam poucos intervalos sem valores, os perfis do multifeixe apresentam esses intervalos em maiores quantidades e tamanhos.

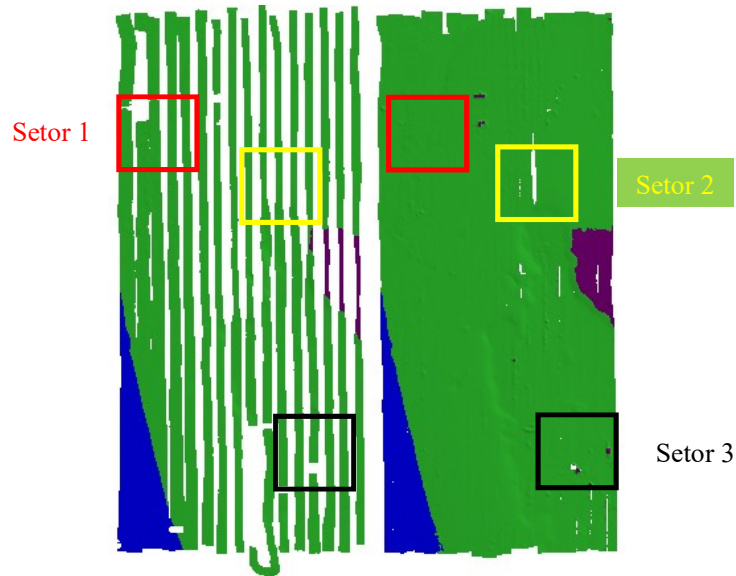


Figura 126 – Setores dos perfis. Setor 1 em vermelho, setor 2 em amarelo e setor 3 em preto. Na esquerda tem-se a camada Depth da superfície MBES e na direita da superfície PDBS.

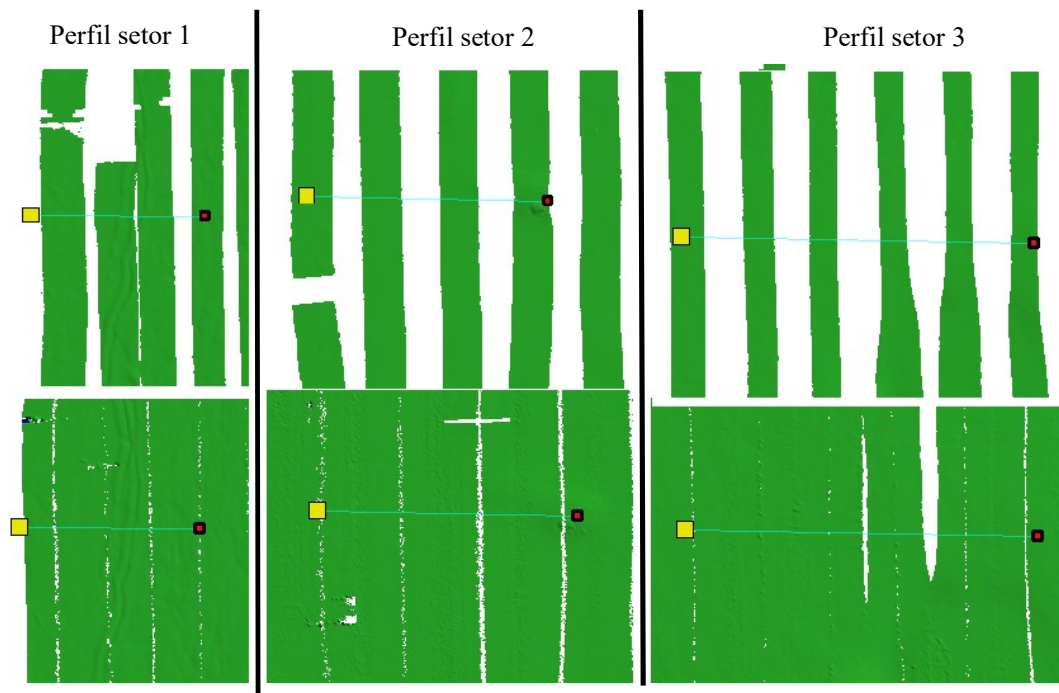


Figura 127 - Setores dos perfis com vista mais próxima. Nos dois quadros da esquerda, tem-se em cima um recorte da camada Depth da superfície MBES e em baixo a mesma camada da superfície PDBS, onde é feito o perfil 1 (variando entre 15 m à 10 m de profundidade). No centro, observa-se a mesma configuração, porém com profundidades variando entre 10 m à 7,5 m. A mesma disposição está à direita, com variações em profundidade de 7,5 m à 5 m. Os pontos amarelos indicam os inícios e os vermelhos os fins de cada perfil (orientação W-E).

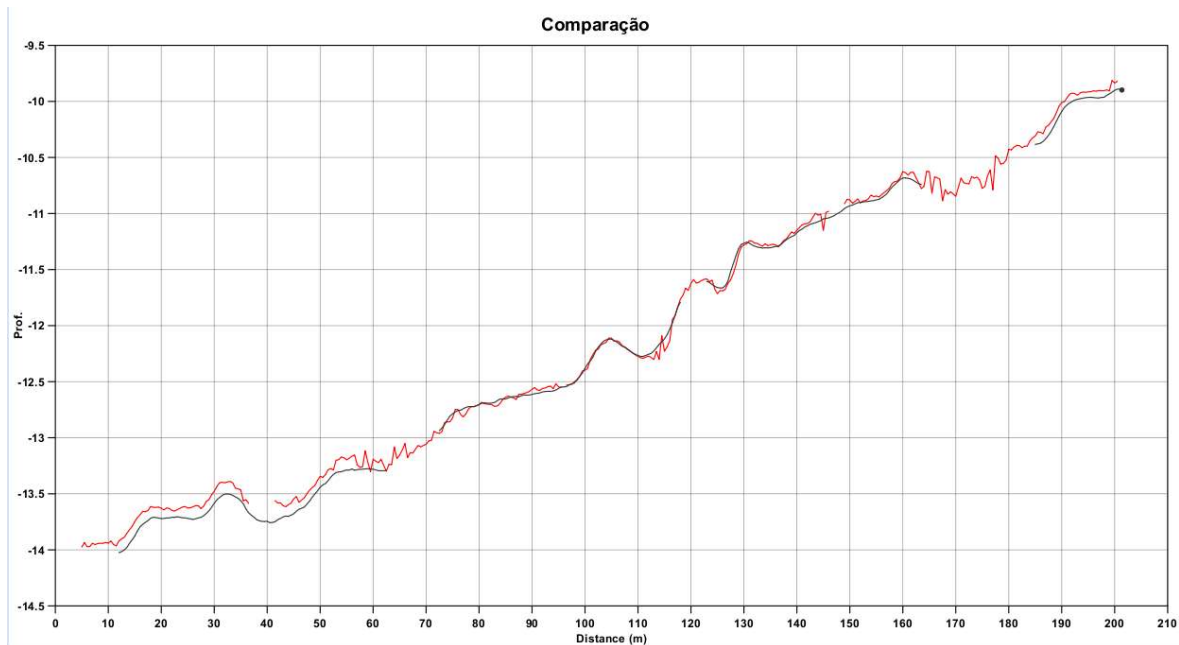


Figura 128 – Perfil setor 1 (orientação W-E). O perfil da camada Depth da superfície MBES está em preto e o da camada Depth da superfície PDBS está em vermelho.

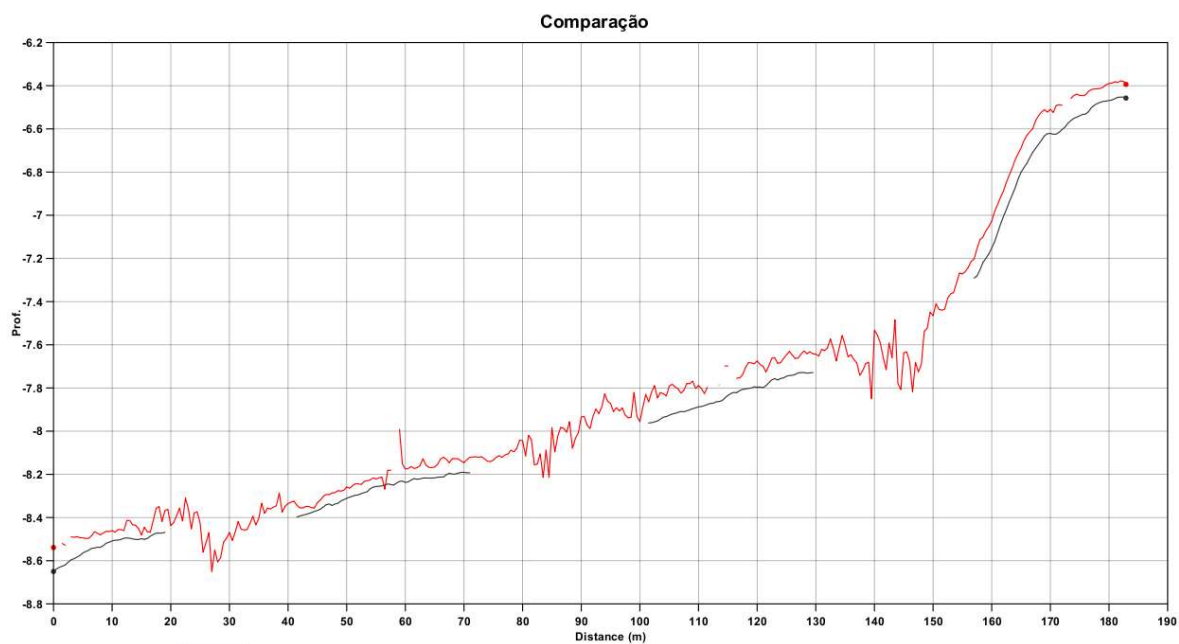


Figura 129 – Perfil setor 2 (orientação W-E). O perfil da camada Depth da superfície MBES está em preto e o da camada Depth da superfície PDBS está em vermelho.

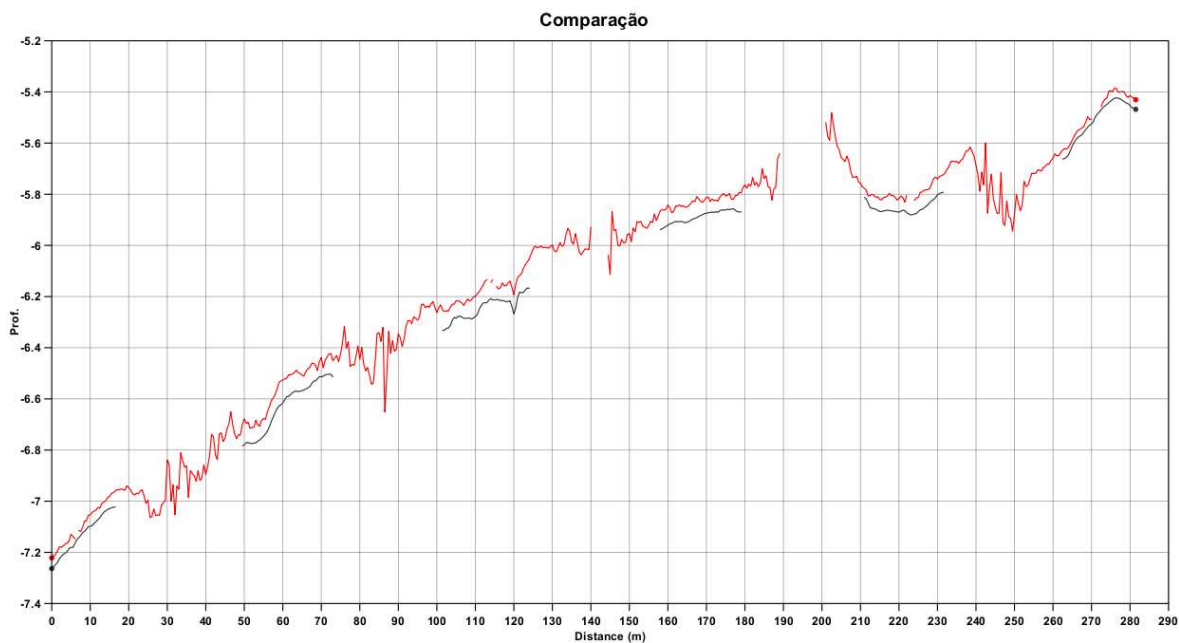


Figura 130 – Perfil setor 3 (orientação W-E). O perfil da camada Depth da superfície MBES está em preto e o da camada Depth da superfície PDBS está em vermelho.

4.5.3 Terceira faixa – 5 m à 2 m

Já nessa faixa, os perfis tendem a aumentar o efeito observado na segunda faixa, ou seja, os *gaps* entre as linhas do multifeixe aumentam muito, enquanto que os das linhas do PDBS são praticamente inexistentes, contudo, ainda permanecem (Figura 131 à Figura 134).

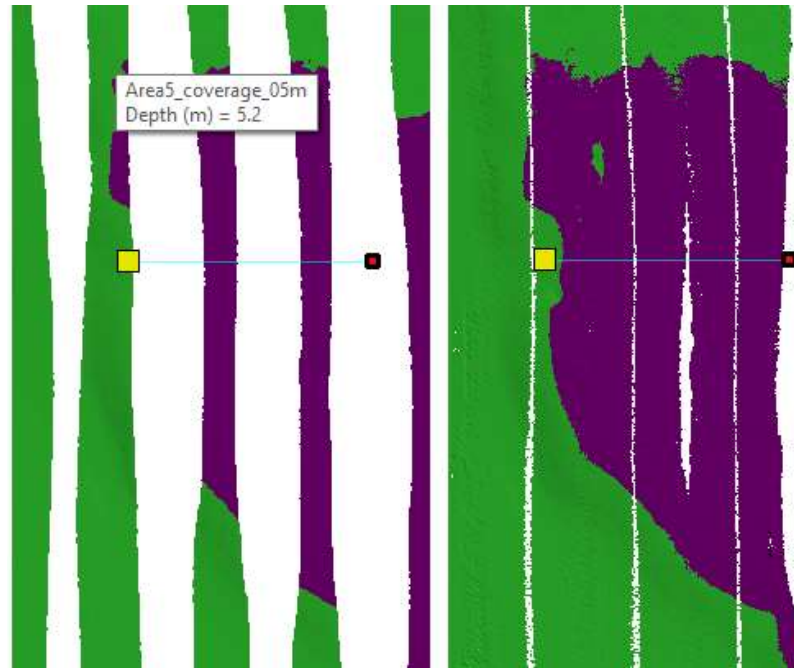


Figura 131 – Perfil 1. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação W-E). Nesta figura, o perfil é feito em profundidades variando de 5 a 2 m. Na esquerda tem-se a camada Depth da superfície MBES e na direita da superfície PDBS.

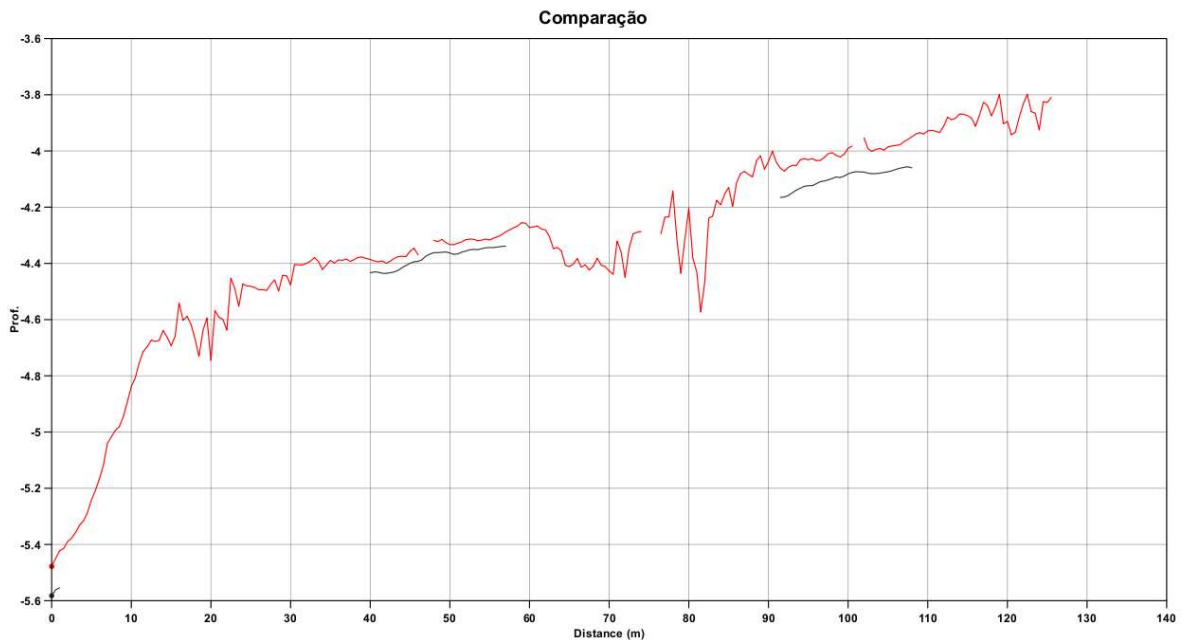


Figura 132 – Perfil 1 (orientação W-E). O perfil da camada Depth da superfície MBES está em preto e o da camada Depth da superfície PDBS está em vermelho.

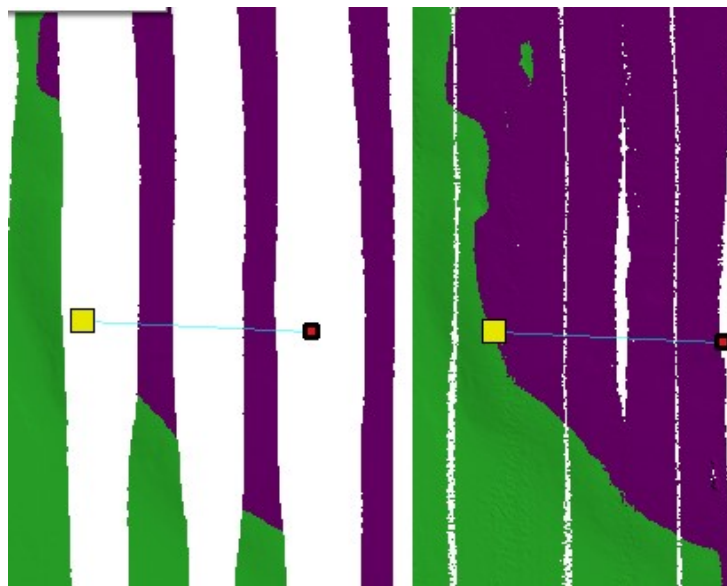


Figura 133 – Perfil 2. O ponto amarelo indica o início e o vermelho o fim (orientação W-E). Na esquerda tem-se a camada Depth da superfície MBES e na direita da superfície PDBS.

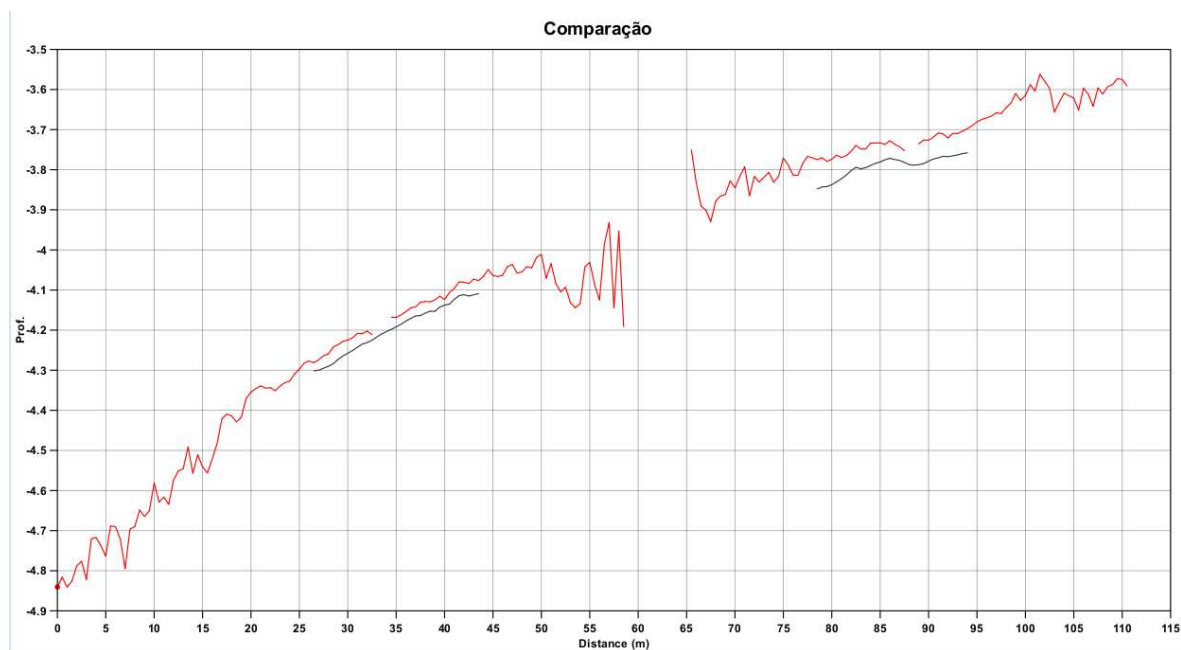


Figura 134 – Perfil 2 (orientação W-E). O perfil da camada Depth da superfície MBES está em preto e o da camada Depth da superfície PDBS está em vermelho.

4.5.4 Conclusões área 5 – eficiência

1 – O teste de eficiência não considerou superposição de linhas e levou em conta apenas o alcance útil da cobertura. Contudo, numa estimativa realista para o multifeixe, com uma superposição de 100%, sabe-se que a distância entre linhas cai pela metade, logo o tempo de

sondagem e a quantidade de linhas dobram. Assim, um teste sem considerar superposição já fornece uma boa base de projeção de tempo de sondagem, pois se sabe que com superposição se levaria aproximadamente o dobro do tempo despendido na sondagem em lide;

2 – Em um raciocínio análogo ao multifeixe, a superposição do PDBS, quando em sondagem batimétrica deve ser 100%. Da mesma forma como o exposto no item 1, o teste sem superposição já fornece uma estimativa de eficiência.

3 – Este teste considerou, para distância entre linhas, uma varredura sem superposição do PDBS, sendo as distâncias ajustáveis de acordo com sua varredura útil do mesmo. Apesar de tal cuidado, durante o processamento, viu-se a necessidade de retirar dados, o que acabou provocando um *gap* entre as linhas deste sensor;

4 – Com a visualização dos perfis e da superfície como um todo, observa-se que as varreduras variam conforme a profundidade, o que levou a dividir a análise em faixas que vão de 25,2 m à 15 m, 15 m à 5 m e 5 m à 2 m.

5 – Na primeira faixa, observa-se que o *gap* entre linhas do MBES é praticamente inexistente, enquanto que o *gap* nadiral do PDBS ainda se encontra presente;

6 – Nas segundas e terceiras faixas, o *gap* entre as linhas do MBES já é bem mais pronunciado, enquanto que o *gap* entre linhas PDBS é praticamente inexistente. Contudo o *gap* do nadir ainda se faz presente.

7 – Para verificar a eficiência em profundidades maiores que 25 m, seriam necessários mais testes, entretanto o consenso que existe é de utilização do multifeixe conforme as áreas vão ficando mais profundas, em função das limitações a que o PDBS está submetido. Assim, a grande limitação de eficiência do MBES é em águas rasas e nesse quesito, em águas mais rasas que 15 metros, o PDBS demonstrou uma eficiência crescente em direção à menores profundidades.

8 – Expressando melhor em números, a sondagem do PDBS teve uma área 37,4%⁴⁰ maior do que a do multifeixe. Esta estimativa pode ser realizada por meio da contabilização das células geradas por ocasião da criação das superfícies. Enquanto que a superfície do interferométrico gerou 6.110.066 células de 0,5 m, a do multifeixe (desconsiderando a última linha, para que as superfícies sejam comparadas de forma igualitária) foi de 3.826.673. Pode-se dizer então que o

⁴⁰ A fórmula para se chegar a esse valor foi $(6.110.066 - 3.826.673) / 6.110.066$

PDBS foi, neste teste, 37,4% mais eficiente em uma área com profundidade média de 9,3 metros. Conforme se vá para menores profundidades, este valor percentual aumentará. Isso se deve à crescente varredura do PDBS. Enquanto que o MBES teve uma varredura útil do fundo marinho constante de, aproximadamente, 3 vezes a profundidade, o PDBS alcançou varreduras de aproximadamente 3,4 vezes a profundidade em área de 20 m, 6,7 vezes a profundidade em área de 9 m e 12 vezes a profundidade em área de 3,5 m. Tais valores mostram a eficiência da varredura cada vez maior do interferométrico conforme a profundidade vai diminuindo.

4.6 RESOLUÇÃO

Para que o teste de resolução seja feito, é interessante que as áreas possuam feições batimétricas a serem exploradas. Assim, esse trabalho só abordará diferentes resoluções nas áreas 1 e 4.

Na área 1, no que tange às rochas submersas, em diferentes resoluções, pode-se ver que a densidade de dados varia, bem como a capacidade de identificação de alvos e os intervalos de informações batimétricas.

A Tabela 14 correlaciona resolução, densidade média de *pings* por nó⁴¹ e quantidade de células⁴². Em uma primeira análise, usar-se-á um critério quantitativo para avaliação das superfícies. Em um interpolador CUBE, o mínimo desejável de *pings* para compor uma célula é 11 (CALDER; MAYER, 2003). Com esse critério, as resoluções de 0,1 m em ambos os sensores e de 0,2 m no MBES são desaconselhadas. Outro critério a ser lavado em conta é o de quantidade de células. Quanto menos existirem, mais fácil será sua manuseabilidade por programas de computador, sendo a redução da quantidade de células entre a melhor resolução (0,1 m) e a utilizada normalmente (0,5 m) chega a ser de aproximadamente 96%.

⁴¹ Para se chegar a este valor, é considerado quantos *pings*, em média, contribuíram para se achar o valor de cada célula ou nó em toda a superfície.

⁴² São consideradas todas as células válidas (com valores de profundidade) existentes na superfície.

Tabela 14 – Diferentes resoluções para a área 1, sendo correlacionadas a densidade média de pings por nó e a quantidade de células, nas superfícies MBES e PDBS.

Resolução	Densidade média de pings por nó		Quantidade de células na superfície	
	MBES	PDBS	MBES	PDBS
0,1 m	2,14	9,7	29.633.137	31.905.864
0,2 m	8,3	36,6	7.659.626	8.434.683
0,3 m	18,6	82,2	3.408.793	3.758.439
0,5 m	51,6	227,6	1.229.908	1.356.961
1,0 m	98,9	448,7	308.003	339.889

Contudo, as superfícies também devem ter suas resoluções avaliadas qualitativamente, por meio de observações visuais. Para tal, é necessário que se observe como se comportam as feições alvos em cada imagem (Figura 135). Pode-se observar que a superfície com resolução de 0,1 m no MBES apresenta intervalos sem valores batimétricos, enquanto que sua equivalente no PDBS os apresenta em menor quantidade, porém os ruídos são muito visíveis. Na superfície com resolução de 0,2 m, os intervalos do MBES são quase inexistentes, mas ainda presentes, enquanto que na superfície do PDBS observa-se que, apesar de reduzidos, os ruídos ainda se fazem muito presentes. Na superfície de resolução de 0,3 m, tanto os intervalos quanto os ruídos já estão praticamente extintos em ambas as superfícies. Na superfície de resolução de 0,5 m, observa-se uma degradação das feições em ambas as superfícies, principalmente nas pequenas rochas ao norte. Na superfície de resolução de 1,0 m, tal efeito se dilata, e algumas feições não passam de um borrão.

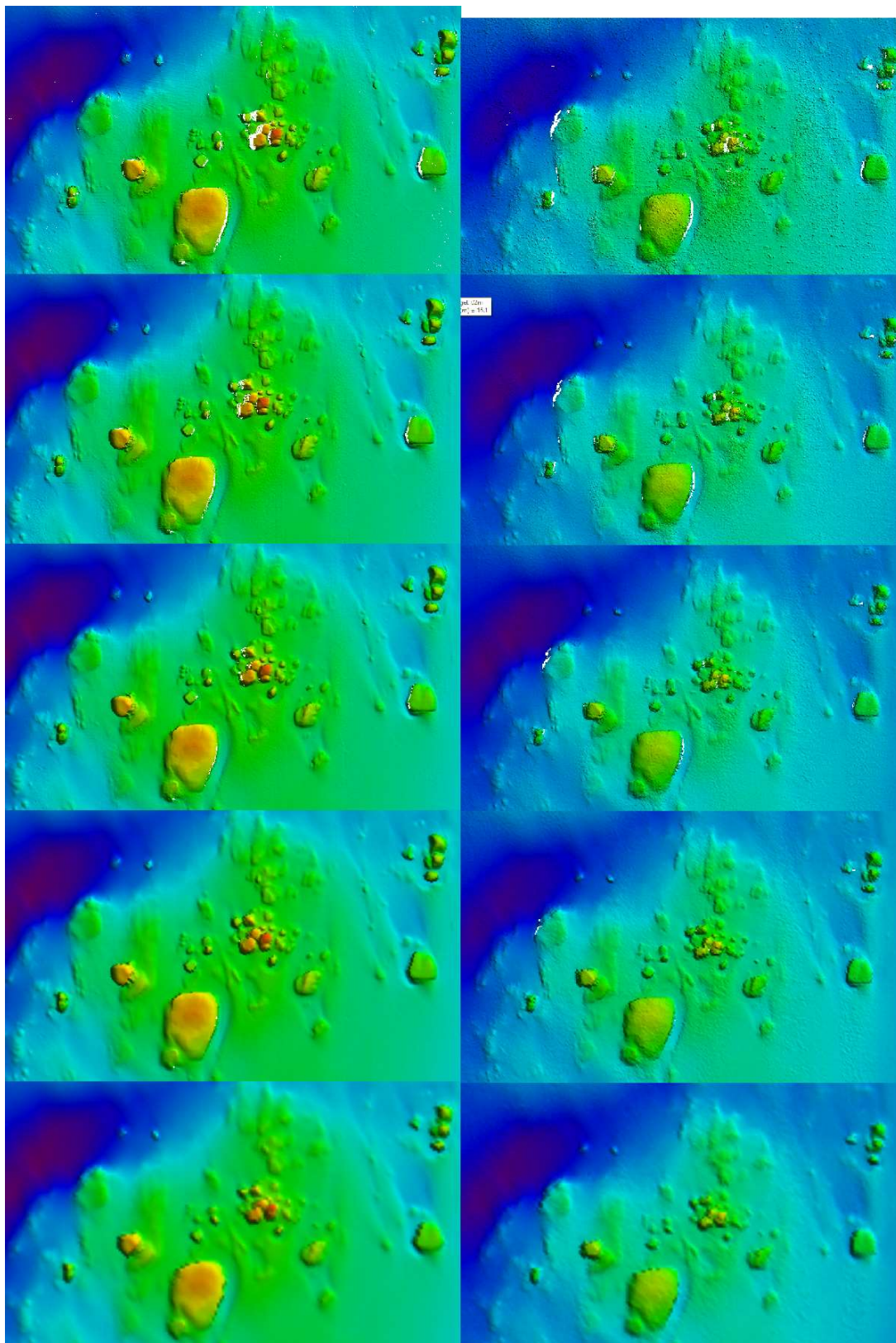


Figura 135 – Imagens da camada Depth das superfícies MBES (esq.) e PDBS (dir). Os quadros de cima estão na resolução de 0,1 m. Na sequência, tem-se resoluções de 0,2 m, 0,3 m, 0,5 m e 1,0 m.

Na área 4 (Tabela 15), as mesmas correlações podem ser feitas. As superfícies de resoluções de 0,1 m e 0,2 m no MBES estão abaixo do aconselhável. O mesmo ocorre na superfície de resolução de 0,1 m do PDBS. De forma análoga à superfície anterior, a queda na quantidade de células na superfície de resolução de 0,1 m para a de 0,5 m é de aproximadamente 95%.

Tabela 15 – Diferentes resoluções para a área 4, sendo correlacionadas a densidade média de pings por nó e a quantidade de células, nas superfícies MBES e PDBS.

Resolução	Densidade média de pings por nó		Quantidade de células na superfície	
	MBES	PDBS	MBES	PDBS
0,1 m	1,9	7,4	14.698.677	15.931.364
0,2 m	5,7	25,5	4.859.268	4.597.204
0,3 m	12,7	57,1	2.182.349	2.058.153
0,5 m	35,2	157,7	789.254	744.743
1,0 m	139,9	625,9	198.785	187.602

Em uma análise qualitativa (Figura 136), na superfície com resolução de 0,1 m, observa-se muitos intervalos sem valores batimétricos nas duas superfícies e uma presença massiva de ruídos no PDBS. Já a superfície com resolução de 0,2 m permite uma excelente visualização do alvo no MBES, contudo apresenta algumas indefinições na borda de uma superestrutura a ré. A sua correlata PDBS ainda apresenta grande quantidade de ruído. Na superfície de resolução 0,3 m, a visualização de ambas é boa, com as feições bem definidas e pouca quantidade de ruído no PDBS. Na superfície com resolução de 0,5 m, as feições estão perfeitamente visíveis, apesar de alguns detalhes começarem a se diluir. O ruído no interferométrico já é quase imperceptível. Na superfície com resolução de 1,0 m, os detalhes das imagens já estão indiscerníveis, contudo a percepção de ruído é nula.

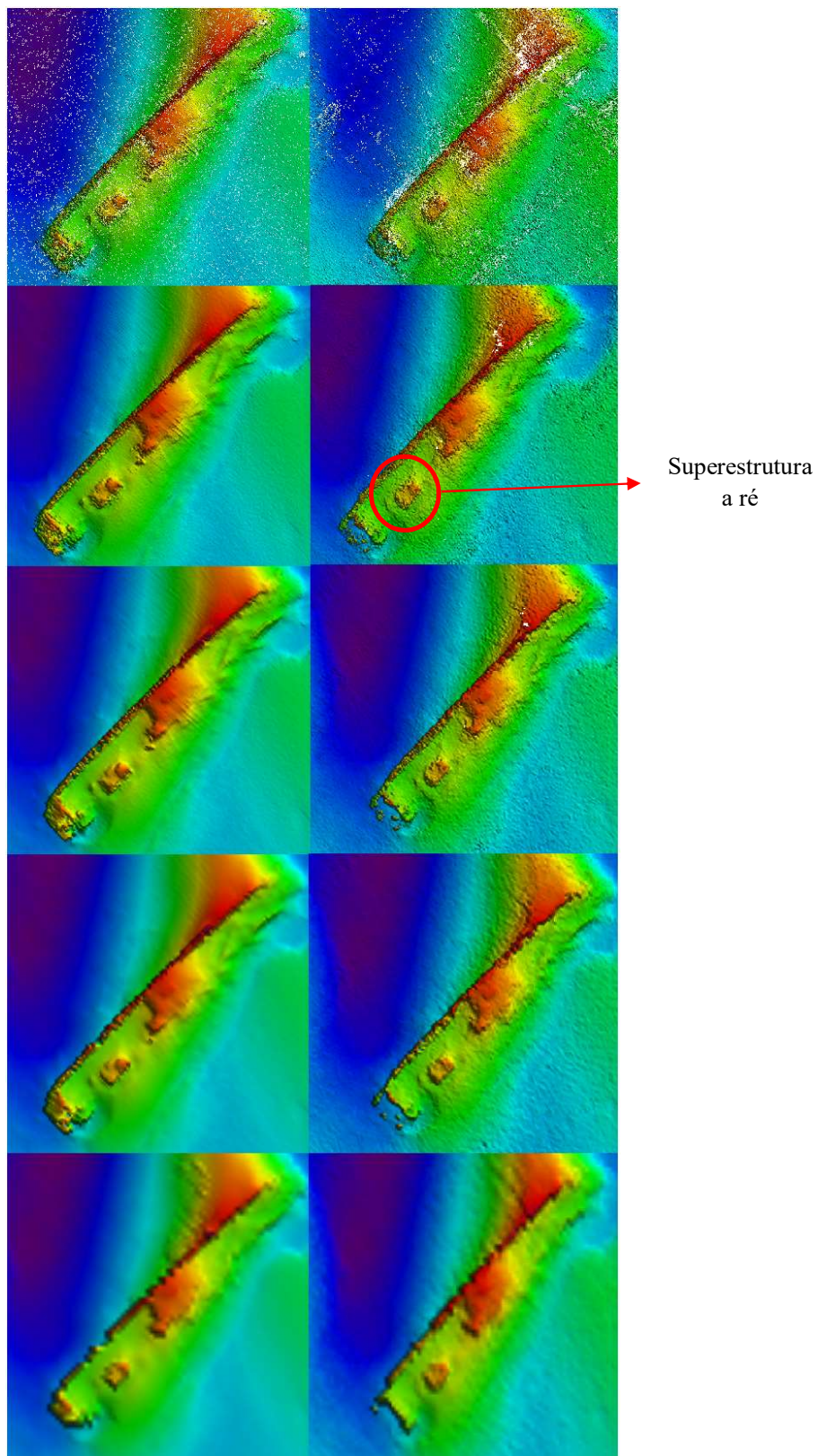


Figura 136 – Imagens da camada Depth das superfícies MBES (esq.) e PDBS (dir). Os quadros de cima estão na resolução de 0,1 m. Na sequência, tem-se resoluções de 0,2 m, 0,3 m, 0,5 m e 1,0 m.

4.6.1 Conclusões do teste de resolução

1 – Para este teste foram elaboradas 5 superfícies para cada sensor, nas resoluções de 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,5 m e 1,0 m. Todas as superfícies foram observadas do ponto de vista quantitativo e qualitativo. Na visão quantitativa, é importante ter-se em conta a quantidade de *pings* por nó. Isto será um indicador da robustez para o cálculo de hipótese. Nesse ponto, no MBES, as superfícies com resoluções de 0,1 m e 0,2 m são desaconselhadas. No PDBS, por conseguir gerar mais *pings* em uma única varredura, a resolução de 0,2 m já atinge o critério mencionado.

2 – Outro ponto a ser estudado é a quantidade de células, principalmente no que tange à recurso computacional. Quanto menor a resolução, menos células e consequentemente, melhor a manuseabilidade. Porém, esse aspecto deve ser pesado de acordo com os recursos computacionais de cada analista. Vale ressaltar ainda que com o avanço da tecnologia de processamento e memória, esta dificuldade tende a ser cada vez menos significativa.

3 – Em uma análise qualitativa, este trabalho dividirá a análise de acordo com os tamanhos de alvos. Para alvos pequenos (área 1), pode-se observar que o MBES apresenta diversos intervalos sem valores batimétricos na superfície com resolução de 0,1 m. A superfície com resolução de 0,2 m também os apresenta, porém em menor número. A superfície com resolução de 0,3 m parece encontrar um bom ponto de equilíbrio, visto que as feições estão muito bem definidas e a quantidade de intervalos é muito baixa, apesar de ainda existirem. As superfícies de resoluções de 0,5 m e 1,0 m começam a sofrer, ainda que em graus diferentes, com o esmaecimento das feições menores. O PDBS apresenta intervalos e ruídos nas superfícies com resoluções 0,1 m e 0,2 m. A com resolução de 0,3 m apresenta poucos intervalos e os ruídos já estão em menores quantidades, também parecendo um bom meio-termo entre as vantagens e desvantagens de uma melhor resolução, visto que as resoluções de 0,5 m e 1,0 m apresentam um leve esmaecimento das feições, ainda que em grau menor do que no multifeixe. Assim, em alvos menores, as resoluções de 0,3 m parecem ter uma relação custo-benefício válida para este caso.

4 – Em alvos maiores (área 4), o MBES apresenta muitos vazios de valores batimétricos na superfície de melhor resolução. Na de 0,2 m, a visualização é boa, entretanto algumas feições do barco ainda ficam um pouco indefinidas. A com resolução de 0,3 m parece, novamente, congrega as vantagens de visualização de detalhes e uma melhor visualização do objeto como um todo. Nas resoluções de 0,5 m e 1,0 m, os detalhes começam a ficar mais indiscerníveis. No PDBS, a superfície com resolução de 0,1 m apresenta muitos vazios de informações

batimétricas. As com resoluções de 0,2 m e 0,3 m apresentam boa definição de imagens, porém o ruído causado por um alvo de maior porte dificulta o discernimento dos *pings* que realmente representam detalhes da imagem. Aqui, a resolução de 0,5 m parece coadunar a queda de ruído com uma boa visualização da imagem, embora se percam algumas visualizações de detalhes. A resolução de 1,0 m já perde muito em detalhe.

5 – Em alvos maiores, para o MBES, a superfície com resolução de 0,3 m se mostrou boa, enquanto que no PDBS vê-se um efeito um pouco diferente. Em alvos maiores e com mais detalhes, o ruído começa a mascarar os dados, fato que não tinha acontecido em alvos menores e com menos detalhes. Com o efeito dos ruídos, conclui-se que a melhor resolução é a de 0,5 m.

6 – Dessa maneira, observa-se que, apesar de conseguir produzir uma quantidade bem maior de *pings* por nó do que o MBES, o PDBS apresenta uma quantidade bem maior de ruídos, o que dificulta uma resolução melhor de suas superfícies. Tal problema pode ser minorado com algum tipo de processamento (filtros ou outros algoritmos de retirada de dados espúrios) que diminua a quantidade de ruído e conseqüentemente a dispersão dos dados tidos como válidos.

7 – Em uma perspectiva geral, este trabalho sugere que sempre se faça uma superfície com resolução de 0,5 m, pois a ausência de vazios nela é uma garantia de imageamento total do fundo à luz do critério da OHI. Soma-se a isso uma melhor manuseabilidade dos dados. Após, a critério do analista e do detalhamento requerido para a visualização de um determinado alvo, sugere-se a produção de superfícies com melhores resoluções, desde que obedecido o limite de robustez do CUBE. Tal necessidade variará caso a caso em função da densidade de dados por área e do tempo disponível para análise. Com este procedimento, as comparações e verificações podem ser feitas na superfície com resolução de 0,5 m e quando se requeira uma melhor visualização de alguma feição, novas superfícies podem ser geradas e verificadas, até atingir o ponto ótimo entre visualização, intervalos de valores batimétricos e efeitos espúrios ou artefatos.

4.7 CONCLUSÕES GERAIS QUANTO AO USO DO SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO

Após todos os testes realizados, é possível chegar-se a algumas conclusões gerais:

1 – Os sensores foram avaliados com relação à precisão em todos os testes, com exceção da área 5 e do teste de resolução. A avaliação foi feita de duas formas diferentes: com relação à incerteza da hipótese e com relação à incerteza amostral do nó. A primeira visava verificar como foi a propagação da IVT enquanto que a segunda era focada na avaliação da dispersão dos dados considerados válidos. O que se viu foi que a sondagem com o MBES conseguiu alcançar Ordem Especial nos dois critérios. O PDBS também teve sua incerteza da hipótese como dentro da Ordem Especial, porém seus dados se apresentaram muito dispersos, o que fez com que sua incerteza amostral do nó não conseguisse atingir Ordem Especial, entretanto ficou dentro do preconizado para Ordem 1a.

2 – Com relação à acurácia, esta foi analisada de 3 formas. Primeiramente, com a ferramenta *QC Report* do *software CARIS HIPS&SIPS*, observa-se que todas as sondagens com o PDBS ficaram dentro da Ordem Especial quando comparadas com as linhas produzidas pelo MBES. A segunda forma foi por meio de comparação das informações representativas de profundidades em uma superfície, que no caso em lide é a camada *Depth*. Nela, em geral, houve uma diferença que oscilou entre 0 m e 10 cm, indicando uma pequena variação para mais raso. A terceira forma foi a camada representativa das profundidades mais rasas (camada *Shoal*), por ser esse o dado exportado para a carta náutica. Esta camada apresentou uma média entre 0,5 m e 0,7 m para mais raso em todas as áreas analisadas. Tal fato foi função, mais uma vez, da dispersão dos dados. Exportar esta camada para a carta náutica não traria riscos à navegação, visto que ela é mais rasa, contudo, pode ter um efeito de diminuir o calado navegável sem devida necessidade.

3 – Foi observado presença de ruído (*noisiness*) e *layover* em várias partes, principalmente em bordas de feições cujos flancos são muito íngremes. Estes efeitos podem ser causados pelos motivos listados no capítulo 2.

4 – A capacidade de identificação de alvos com grande estrutura vertical por parte de PDBS foi muito boa, porém também foi visto que quando este eco é muito fraco, ele pode se confundir com o ruído, impedindo o discernimento do primeiro.

5 – A eficiência do PDBS é maior do que a do MBES quando testado em uma área plana, sendo este sensor muito útil em profundidades menores que 15 metros. Surge ainda o problema do *gap* do nadir, que faz com que haja a necessidade de 100% de superposição, como já é de praxe no MBES.

6 – Apesar de ter uma densidade de dados por área bem maior do que o multifeixe, o *sidescan sonar* interferométrico apresenta uma quantidade de ruídos e dados espúrios muito grande, que superfícies com resoluções mais altas, se tornam mais evidentes. Tal fato é um impeditivo para uma melhora de resolução, o que deixa o PDBS em condições de igualdade com o MBES.

7 – Pela quantidade de ruído existente, é impossível fazer um processamento manual. Este trabalho adotou o mesmo processamento automático utilizado pela empresa *Kongsberg Maritime*, que é um processamento baseado em uma série de filtros estatísticos. Porém, estes ainda demonstram algumas falhas. O que se vislumbra é que o processamento do interferométrico deve ser feito em duas etapas: uma estatística e outra manual, fim limpar mais os dados e melhor delinear feições.

8 – Dessa forma, baseado nesses testes e tendo em vista as limitações do interferométrico, chega-se à conclusão que este sensor é aconselhável para áreas mais rasas que 15 metros, em áreas já cartografadas e que sejam eminentemente planas. A sondagem em áreas mais acidentadas pode ser feita em locais cuja escala da carta sejam menores, onde a incerteza no delineamento de uma borda de feição possa vir a ser diluída na seleção de sondagem ou absorvida pela escala da carta. A incerteza na definição da borda das feições foi em torno de 1 m (tal resultado pode ser aferido através da medição da espessura da incerteza na superfície diferença das camadas *Shoal*), o que pode vir a inviabilizar a Ordem Especial. Tal alcance também já se mostrou difícil a partir da medição da incerteza amostral de cada nó. Contudo, tais fatores não seriam um problema para o alcance da Ordem 1a (Tabela 16).

Tabela 16 – Sugestão de área para sondagem com o PDBS.

Sensor	Área			Ordem	Observação
	Profundidade	Escala	Geomorfologia do fundo		
MBES	Qualquer ⁴³	Depende do THU	Qualquer	Especial	XXX
PDBS	≤ 15 metros	≤ 1:3571 ⁴⁴	Evitar áreas com gradientes abruptos	1a	Área já cartografada

9 – Assim, o PDBS se mostra um bom sensor para manutenção de sondagens em cartas náuticas e também para monitoramentos de profundidades, desde que não seja requerida Ordem Especial.

10 – Todas as vantagens e desvantagens do PDBS, elencadas pela literatura e expostas no item 1.3, foram verificadas e ratificadas nos testes realizados.

⁴³ O escopo deste trabalho não foi avaliar a performance do MBES. O que se verificou é que a eficiência do PDBS, a partir dos 15 metros de profundidade para mais raso, aumenta gradualmente. Porém, isso não invalida o MBES para baixas profundidades. Sabe-se ainda que em profundidades muito rasas, o MBES tem o desempenho equivalente ao ecobatímetro monofeixe, contudo tais fatos não foram levados em consideração.

⁴⁴ O cálculo da escala foi feito considerando a incerteza média da indefinição das bordas das rochas em relação a multifeixe, que foi de, em média, 1 m (utilizou-se o valor de redução gráfica 0,28 mm), pois verificou-se que as feições e suas profundidades eram percebidas, porém com este valor de incerteza em seu delineamento. Caso se leve em consideração a THU máxima preconizada para a ordem 1a (5 m + 5% da profundidade), a escala seria ainda mais restritiva, sendo aceito apenas valores ≤ 1:25000. Contudo, este é um parâmetro que deve ser calculado tendo-se em vista o THU alcançado durante o levantamento, a experiência do analista e o propósito da sondagem.

5. CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um levantamento hidrográfico é um processo complexo de se obter informações acerca do ambiente habitado. O levantamento batimétrico, parte integrante do primeiro, se destaca em sua complexidade, devido às variáveis com que lidam e com o alto grau de precisão e acurácia requerido.

Por sua vez, os utilizadores finais de um levantamento hidrográfico exigem e necessitam de levantamentos cada vez mais confiáveis, sob pena de, caso não o sejam, cair em pesados compromissos financeiros, administrativos e criminais.

Assim, há a demanda para que as sondagens batimétricas sejam mais eficientes e eficazes, sendo realizadas com grande exatidão e ao menor custo. Nesse contexto, surge o sonar de varredura lateral interferométrico, com a promessa de ser uma opção aos meios tradicionais existentes, o ecobatímetro multifeixe, para maior eficiência e redução de custo. Contudo, em uma análise mais apurada, observa-se que uma tecnologia não é capaz de simplesmente substituir a outra e sim complementá-la, pois o PDBS compensa limitações do multifeixe e vice-versa. Os países e seus respectivos Serviços Hidrográficos mundialmente reconhecidos por sua qualidade se dividem em relação a como considerar o PDBS.

Nesse contexto global, o Brasil, sendo representado hidrograficamente pela DHN, não se posicionou a respeito do uso dessa tecnologia no que diz respeito à sua aplicação para atualização de carta náutica, à luz das especificações da OHI.

A tecnologia do sonar interferométrico, quando comparada à tecnologia do MBES, apresenta vantagens e desvantagens que podem tanto vir a aumentar muito a eficiência em uma sondagem quanto impossibilitá-la. No intuito de dirimir tais dúvidas, foi elaborada uma série de testes que visaram verificar capacidades específicas do PDBS frente ao MBES. Em linhas gerais, chegou-se à conclusão que é possível se operar e realizar levantamentos batimétricos com o sonar interferométrico, porém com algumas restrições. Concluiu-se que ele não é um substituto ao ecobatímetro multifeixe para levantamentos de ordem especial, entretanto, é uma alternativa para determinadas situações e objetivos onde as demandas de precisão são menos restritivas.

Sempre existirão mais variáveis que podem vir a alterar o resultado deste teste em uma futura oportunidade. Mudanças do tipo de fundo, frequências utilizadas, profundidades

sondadas, embarcações de sondagem, estado do mar/tempo são exemplos de incógnitas que uma vez diferentes das que compuseram este teste, podem vir a trazer conclusões que difiram das atuais. Importante que os usuários e analistas do equipamento estejam cientes das suas limitações e potencialidades, de forma a usá-lo, explorando ao máximo suas vantagens e minorando suas desvantagens.

Voltando às duas hipóteses formuladas no início do presente documento, pode-se concluir que:

Hipótese 1 – Em águas brasileiras, o PDBS, montado em uma embarcação por meio de uma haste, é capaz de fornecer informações batimétricas cujas incertezas verticais estejam dentro das preconizadas pela OHI. Verdadeira. Verificou-se que a sondagem com o PDBS pode alcançar o preconizado pela OHI dentro da Ordem 1a.

Hipótese 2 – Em águas brasileiras, o PDBS, montado em uma embarcação por meio de uma haste, é capaz de fornecer uma superfície batimétrica que seja compatível com a superfície batimétrica da mesma área gerada por um MBES. Verdadeira. Salvo algumas variações de máximos e mínimos alcançados, pode-se verificar um padrão entre as superfícies, sejam elas *Depth* ou *Shoal*. Os efeitos do máximo e mínimo foram amplamente discutidos e cabe ao operador / analista atuar de modo a saber quando o custo-benefício da utilização do sonar de varredura lateral interferométrico compensa em detrimento do ecobatímetro multifeixe, tendo ciência de todos os riscos e vantagens a ele associados.

Contudo cabe ainda considerar que os países que aceitam o sonar interferométrico têm normas mais específicas que a própria OHI, sendo muitas vezes mais restritivas nos critérios elencados e também estipulando outros que não foram abarcados⁴⁵, como é o caso dos Estados Unidos, Canadá e Nova Zelândia. Em uma análise comparativa, observa-se que as normas brasileiras, em especial a NORMAM-25 (Rev. 2), replicam majoritariamente as especificações e as Ordens de LH preconizadas na S-44 (5ª Edição), sendo, de forma geral, mais branda que as normas dos países supracitados. Pensar em adotar o sistema interferométrico no Brasil perpassa, obrigatoriamente, pela condução de testes sistemáticos em águas brasileiras por parte das entidades proponentes e da efetiva comprovação dos resultados alcançados por cada modelo de equipamento empregado junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação e ao Centro de

⁴⁵ Existem critérios que a NORMAM-25 ainda não contempla, tais como: densidade de medição por nó de uma superfície ou por feição a ser detectada e ainda parâmetros mais estritos de incerteza vertical total e tamanho da feição a ser identificada.

Hidrografia da Marinha. Tais resultados, uma vez efetivamente consistentes à luz da Segurança da Navegação, poderão subsidiar uma revisão das normas atuais.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após intensa investigativa dos dados, sugere-se para trabalhos futuros: 1 – Testar o PDBS em diferentes situações das que tiveram lugar neste trabalho, sejam elas ambientais ou operacionais, incluindo outros biomas, como os rios amazônicos ou pantaneiros; 2 – Testar o PDBS em diferentes plataformas, como os AUV e os USV; 3 – Testar o PDBS de diferentes fornecedores; e 4 – Desenvolver uma melhor metodologia de processamento de dados interferométricos, de forma que venham a melhorar a precisão e acurácia, onde possam ser conjugados filtros estatísticos e processamentos manuais.

Assim, os testes devem continuar em prol de aumentar a robustez dos resultados aqui alcançados ou concluir-se adversamente, mostrando situações dantes não visualizadas ou abarcadas.

Nesse contexto, ressalta-se novamente o lema da Diretoria de Hidrografia e Navegação, que é a tônica do Levantamento Hidrográfico e do método científico: “Restará sempre muito o que fazer...”

6. BIBLIOGRAFIA

AI, Yuhui; ARMSTRONG, Straud; FLEURY, Dean. Evaluation of the Klein HydroChart 3500 interferometric bathymetry sonar for NOAA sea floor mapping. In: OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, 1., 2015, Washington, USA. *Proceedings...* New York, USA: Marine Technology Society (MTS)/Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015. 2891p, p. 114-120.

AI, Y ; PARENT, M. Performance Analysis Using an Uncertainty Model for HydroChart 5000. *Sea Technology*, Arlington, United States: Compass Publications Inc., 2011. Disponível em: <<https://geo-matching.com/uploads/default/m/i/migrationvwmfdr.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

ALLABY, Michael. *Dictionary of Earth Sciences*. 3 ed. New York, USA: Oxford University Press, 2008. 654p, p. 15-301.

ĂRĂCIN, Aruel; CALIN, Alexandru. Interferometric Bathymetry - principles and utility. *Recent Advances in Geodesy and Geomatics Engineering: Proceedings of the 1st European Conference of Geodesy & Geomatics Engineering (GENG '13)*, Antalya, Turkey: WSEAS Press. p. 198–205, out. 2013.

BEAUDOIN, J. D.; HUGHES CLARKE, J. E.; BARTLETT, J. E. Application of surface sound speed measurements in post-processing for multi-sector multibeam echosounders. *International Hydrographic Review*, New York, USA: Oxford University Press, v. 5, n. 3 (Nova Série), p. 17–32, 2004.

BIBULI, M. et al. Unmanned Surface Vehicles for automatic bathymetry mapping and shores' maintenance. In: Oceans 2014 - Taipei, 1., 2014, Taipei, Taiwan. *Proceedings...* Taipei: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1-7, abr. 2014.

BJØRNØ, L. Developments in sonar and array technologies. In: 2011 IEEE Symposium on Underwater Technology, UT'11 and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, SSC'11, 1., Tokyo, Japan. *Proceedings...* Tokyo: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1-11, abr. 2011.

BLODEL, Philippe. *The Handbook of Sidescan Sonar*. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd., 2009. 311p.

BONGIOVANNI, Cassandra.; SCHMIDT, Val. Evaluating Outside Source Interferometric

Data for Chart Updates. In: 2016 Canadian Hydrographic Conference (CHC-2016), 1., 2016, Halifax, Canada. *Proceedings...* . 2016. pp. 1-14.

BRASIL. Decreto-lei n° 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1960-1969/decreto-lei-243-28-fevereiro-1967-376132-norma-pe.html>>. Acesso em: 07 set. 2018.

BRISSON, L. N.; WOLFE, D.; STALEY, M. P. S. M. Interferometric swath bathymetry for large scale shallow water hydrographic surveys. In: 2014 Canadian Hydrographic Conference (CHC-2014), 1., 2014, St. John's N&L, Canada. *Proceedings...* . 2014. pp. 1-18.

CALDER, B. R.; MAYER, L. A. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems: G3*, Washington, USA: American Geophysical Union & Geochemical Society, v. 4, n. 6, 2003. pp. 1-22, jun. 2003.

CARIS. *CARIS HIPS and SIPS 10.2 Reference Guide*, 2017. 494p.

_____. *Caris Training Module Multibeam Data Processing With CUBE*, 2014. 220p.

CARTWRIGHT, Doug. *Multibeam Bathymetric Surveys in the Fraser River Delta, Managing Severe Acoustic Refraction Issues*. Fredericton, 2003. 168 f. Dissertação (Master of Engineering) - Unit of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, 2003.

CANADIAN HYDROGRAPHIC SERVICE (CHS), *Canadian Hydrographic Service STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS*. 2nd Edition. 2013. 17 p.

CLARKE, J. E. H. *Conventional and Bathymetric Sidescan*. 23 out. 2013. 28 slides. Material apresentado para disciplina de Imaging and Mapping II (Inglês), curso de Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

_____. *Multibeam Bottom Detection*. 2013. 47 slides. Material apresentado para disciplina de Imaging and Mapping II (Inglês), curso de Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

_____. *Multibeam Introduction*. 16. out. 2012. 41 slides. Material apresentado para disciplina de Imaging and Mapping II (Inglês), curso de Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

_____. *USHC in Gavelston*. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <rodrigo.carvalho@mar.mil.br> em 09 mai. 2017.

COLLINS DICTIONARY. Disponível em:

<<https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/interferometer>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

DE MOUSTIER, C. State of the art in swath bathymetry survey systems. *International Hydrographic Review*, Mônaco: International Hydrographic Bureau, v. 65, n. 2, p. 25–54, 1988.

DENBIGH, P. N. Swath Bathymetry: Principles of Operation and an Analysis of Errors. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 14, n. 4, p. 289–298, 1989.

DEWITT, B. N. T. et al. *Archive of Side Scan Sonar and Swath Bathymetry Data Collected During USGS Cruise 10CCT01 Offshore of Cat Island, Gulf Islands National Seashore, Mississippi, March 2010*. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/ds/577/>>. Acesso em 25 mai. 2018.

DEWITT, B. N. T. et al. *Archive of Sidescan Sonar and Swath Bathymetry Data Collected During USGS Cruise 13CCT04 Offshore of Petit Bois Island, Gulf Islands National Seashore, Mississippi, August 2014*. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/ds/0917/ds917_abstract.html>. Acesso em: 25 mai. 2018.

DICIONÁRIO BRASILEIRO DA LÍNGUA PORTUGUESA - MICHAELIS. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/interferometria/>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). *III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro*. Niterói - RJ: DHN, 2016. 52p.

_____. *Carta 12000: símbolos, abreviaturas e termos usados nas cartas náuticas*. 4. ed. Niterói - RJ: Ed. DHN, 2014. 107p. Textos em português e inglês.

_____. *Normas da Autoridade Marítima Para Levantamentos Hidrográficos - NORMAM-25/DHN*. 2ª Revisão. 2017.

DODD, D. *Uncertainty Evaluation of the EdgeTech 4600 Swath Bathymetry System*. In: US Hydrographic Conference 2013, 1., 2013, New Orleans, United States. *Proceedings...* . 2013.

ENCICLOPEDIA DELLA SCIENCIA E DELLA TECNICA. Disponível em:

<http://www.treccani.it/enciclopedia/interferometria_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/>. Acesso em: 13 dez. 2017.

ENGLISH OXFORD LIVING DICTIONARY. Disponível em:

<<https://en.oxforddictionaries.com/definition/interferometer>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

FLORIANI, B. L. *Proposta de uma solução conceitual de um sistema de investigação subaquático para águas rasas*. Florianópolis, 2013. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departament de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

FRANCO, A. S. *Marés: Fundamentos, Análise e Previsão*. 2. ed. Niterói - RJ: Base de Hidrografia da Marinha, 2009.

GARELLO, R. et al. Radar and sonar interferometry. In: Acoustics 08 Paris, 1., 2008, Paris, França. *Proceedings...* . 2008. pp. 6297-6302.

GEBCO GROUP. *Questinnaire regarding the IHO-S44 Standard for Hydrographic Surveys*. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <gebco_folk@mailman.ngdc.noaa.gov> em 15 nov. 2017.

GENTILHOMME, M. *GeoSwath Plus - Importing GeoSwath Data in CARIS HIPS, the GSF Route 9-GS00-6322/A*. Norfolk - United Kingdom: KONGSBERG GEOACOUSTICS LTD, 2016. 21p.

GOSTNELL, C. Efficacy of an interferometric sonar for hydrographic surveying: Do interferometers warrant an in-depth examination? - A Preliminary Study. In: US Hydrographic Conference 2005, 1., 2005, San Diego, United States. *Proceedings...* . 2005.

GOSTNELL, C.; YOOS, J.; BRODET, S. NOAA test and evaluation of interferometric sonar technology. In: 2006 Canadian Hydrographic Conference (CHC-2006), 1., 2006, Halifax, Canada. *Proceedings...* . 2006.

HICKS, S. D. *Understanding Tides*. Maryland, United States: Center for Operational Oceanographic Products and Services, 2006. 66p. Inglês.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). *Convenção internacional para salvaguarda da vida humana no mar*. Edição consolidada até 01 jul. 2014. 2014. p. 360.

JERRAM, K.; SCHMIDT, V. *Object Detection with Phase-Measuring Bathymetric Sidescan*

Sonar Depth Data. Durham, United States, 2015. White Paper - Center for Coastal and Ocean Mapping. Disponível em:

<http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Object_detection_with_PMBS.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2018.

_____. *Storm Response Surveying with Phase-Measuring Bathymetric Sidescan Sonar*. Durham, United States, 2015. White Paper - Center for Coastal and Ocean Mapping. Disponível em: <http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Response_surveying_with_PMBS.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2018.

JIN, G.; TANG, D. Uncertainties of differential phase estimation associated with interferometric sonars. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 1, p. 53–63, 1996. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/485201/>>. Acesso em: 23 dez. 2017.

JIN, J. et al. Active and passive underwater acoustic applications using an unmanned surface vehicle. In. OCEANS 2016 - Shanghai, 1., 2016, Shanghai, China. *Proceedings...* . 2016.

KJERFVE, B. et al. Oceanographic Characteristics of an Impacted Coastal Bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Continental Shelf Research*, Great Britain: Elsevier Science Ltd, v. 17, n. 13, p. 1609–1643, 1997.

KONGSBERG MARITIME. *Geoswath plus remus 100*. 2016. 2p

_____. *GeoSwath Plus wide swath bathymetry system - Instruction Manual*, 2014a. 639p.

_____. *Introduction to Multibeam Theory*. 31 jan. 2014. 132 slides. Material apresentado no curso de Operador de Ecbatímetro Multifixe EM 2040.

KOPACZ, Z.; MORGAS, W.; URBANSKI, J. The Process of Creation of Bathymetric Information. *International Hydrographic Review*, Mônaco: International Hydrographic Bureau, v. 75, p. 27-40, mar. 1998.

L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS. *Multibeam Sonar Theory of Operation*. East Walpole, United States: L-3 Communications SeaBeam Instruments, 2000. 107p.

LAPPALAINEN, J.; STORGÁRD, J.; TAPANINEN, U. The effectiveness of maritime safety policy instruments from the Finnish maritime experts' point of view – case Gulf of Finland and prevention of an oil accident. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Gdynia, Polônia: Transnav, v. 7, n. 3, p. 353–362, 2013.

LURTON, X. Swath Bathymetry Using Phase Difference: Theoretical Analysis of Acoustical Measurement Precision. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 25, n. 3, p. 351–363, 2000. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/855385/>>. Acesso em: 23 jan. 2018.

LURTON, X.; AUGUSTIN, J. M. A measurement quality factor for swath bathymetry sounders. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 35, n. 4, p. 852–862, 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5607320/>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

MA, K.; XU, W.; XU, J. The Comparison between Traditional and Interferometric Multibeam Systems. In: 6th International Conference on Sensor Network and Computer Engineering (ICSNCE 2016). 6., 2016, Xi'an, China. *Proceedings...* . Atlantis Press, 2016. p. 261-264.

MAIA, P.; FLORENTINO, C; PIMENTEL, V.B. Fluxo de Dados Hidrográficos para a Produção de Documentos Náuticos. In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva. 2017, Rio de Janeiro. *Anais...* . Sociedade Brasileira de Cartografia: 2018, p. 6-10.

MADRICARDO, F.; FOGLINI, F.; TONIELLI, R. Bathymetric Surveys in Super-Shallow Water: Case Study of The Lagoon of Venice, Italy. In: 4th International Conference & Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. 4., 2011, Kos Island, Greece. *Proceedings...* . 2011, p. 1233-1288.

MIGUES, A. P. *Navegação: a Ciência e a Arte*. Rio de Janeiro: DHN, 1996. 538p. v. 1 - Navegação Costeira, Estimada e em Águas Restritas.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). *Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables*, 2017. 161p. Disponível em: <<http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/specs/specs.htm>>. Acesso em: 16 dez. 2017.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). *Especificação da OHI para Levantamentos Hidrográficos*: Publicação Especial N° 44 (S-44). Trad. Peter Esteves. Niterói - RJ: DHN, 2008. 32p. Tradução de *IHO Standards for Hydrographic Surveys*: Special Publication N° 44 (S-44). Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau. 2008. 28p.

_____. *Manual de Hidrografia*: Publicação C-13. Trad. Instituto Hidrográfico. Lisboa, Portugal: Instituto Hidrográfico, 2005 (correções até 2010). 548p. Tradução de *Manual on Hydrography*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau.

PEREIRA, D. L. DA S. *Improving Shallow-Water Multibeam Target Detection at Low Grazing*

Angles. Fredericton, 2015. 99 f. Dissertação (Master of Engineering) - Unit of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, 2015.

_____. Incertezas e Controle de Qualidade na Medição de Profundidades por Meio de Ecobatímetros Multifeixe. *Anais Hidrográficos*, Niterói: DHN, v. 73. p. 53-65, 2016.

PFEIFFER, W. R. et al. *Archive of Side Scan Sonar and Swath Bathymetry Data Collected During USGS Cruise 10CCT02 Offshore of Petit Bois Island Including Petit Bois Pass, Gulf Islands National Seashore, Mississippi, March 2010*. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/ds/577/>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

QPS. *CUBE Algorithm*. Página que explica parte do processamento de dados batimétricos pelo algoritmo CUBE no software QINSy. Disponível em: <<https://confluence.qps.nl/qinsy/en/cube-algorithm-35589329.html>>. Acesso em: 9 maio. 2018.

SANTOS, A. P. et al. Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais Utilizando Técnicas de Estatística Espacial: Proposta de Método e Exemplo Utilizando a Norma Brasileira. *BCG - Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba: UFPR, 2016, v. 22, n. 4, p. 630-650, 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/49633>>. Acesso em: 30 mai. 2018.

SARRABEZOLE, A.; LASSERRE, F.; HAGOUAGN'RIN, Z. Arctic shipping insurance: towards a harmonisation of practices and costs?. *Polar Record*, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2014. v. 52, n. 4, p. 393–398, 2016.

SAUCAN, A. A. et al. Model-Based Adaptive 3D Sonar Reconstruction in Reverberating Environments. *IEEE Transactions on Image Processing*, IEEE Signal Processing Society, 2015. v. 24, n. 10, p. 2928–2940, 2015.

SCHMIDT, V.; JERRAM, K. *GeoAcoustics GeoSwath Plus Data Processing with CARIS HIPS 8.1 in support of Sandy Supplemental Research*. Durham, United States, 2015. Best Practices - Center for Coastal and Ocean Mapping. Disponível em: <http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Caris_81_GeoSwath_guide.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2018.

SCHMIDT, V.; WEBER, T. C.; LURTON, X. Optimizing Resolution and Uncertainty in Bathymetric Sonar Systems. In: 1st Underwater Acoustics International Conference and Exhibition: Technologies and Results, 1., 2013, Corfu, Greece. *Proceedings...* . 2013. p. 1389-

1396. Disponível em: <<http://scholars.unh.edu/ccom/848>>. Acesso em: 21 mai. 2018.

SIMMONS, S. M. et al. An evaluation of the use of a multibeam echo-sounder for observations of suspended sediment. *Applied Acoustics*, Great Britain: Elsevier Science Ltd, 2017. v. 126, p. 81–90, 2017.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *EM 1110-2-1003 - Engineering and Design Hydrographic Surveying*. Washington, United States, 2013. 700p.

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (UFF). *Apresentação de Trabalhos Monograficos de Conclusao de Curso*. 10 ed. ver. e atualizada por Estela dos Santos Abreu e José Carlos Abreu Teixeira. Niterói: EdUFF, 2012. 83p.

UXL ENCIPOEDIA OF SCIENCE. Disponível em: <<http://www.encyclopedia.com/science-and-technology/physics/physics/interferometry#1G23438100373>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

WILBY, A. D. The Advantages, Challenges and Practical Implementation of an Interferometric Swath Bathymetry System. In: OCEANS'99 MTS/IEEE, 1999, Seattle, United States: IEEE, 1999. *Proceedings...* . p. 23-29.

WILLIAMS, C. R. Hydrographic surveying and charting. *International Hydrographic Review*, Mônaco: International Hydrographic Bureau, v. 57, n. July, p. 9–12, 1980.

WOOCK, P.; FREY, C. Deep-sea AUV navigation using side-scan sonar images and SLAM. In: OCEANS'10 IEEE, 2010, Sidney, Australia: IEEE, 2010. *Proceedings...* . Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5603528/>>. Acesso em: 16 mai. 2018.