

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Modelação de dados batimétricos com estimação de incerteza

João Paulo Delgado Vicente

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica

Tecnologias e Aplicações

2011

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Modelação de dados batimétricos com estimação de incerteza

João Paulo Delgado Vicente

Dissertação de Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica

Tecnologias e Aplicações

Trabalho realizado sob a supervisão de:

Professora Doutora Ana Cristina Navarro Ferreira (FCUL)

Professor Doutor Aldino Manuel dos Santos de Campos (EMAM)

2011

Resumo

A evolução dos sondadores acústicos impôs aos Serviços Hidrográficos novas metodologias na interpretação, manuseamento e aplicação da informação hidrográfica. Considerando a elevada densidade de dados adquiridos pelos sondadores multifeixe, alguns Serviços foram impelidos a uma redefinição do produto final de um levantamento hidrográfico. Este foi definido, em 2010, pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) como uma superfície batimétrica construída a partir do algoritmo *Combined Uncertainty Bathymetry Estimator* (CUBE), onde a estimação de profundidade toma em consideração a incerteza das medições observadas. Actualmente, no Instituto Hidrográfico (IH), o produto final de um levantamento hidrográfico é constituído por um subconjunto discreto de sondas mínimas espaçadas de forma irregular, extraído do conjunto total de sondas validadas, seguindo recomendações e requisitos definidos pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI). De modo a avaliar o processamento efectuado com recurso ao CUBE para efeitos da cartografia náutica, foram analisados diferentes levantamentos hidrográficos. As sondas mínimas validadas pelo hidrógrafo foram comparadas com as profundidades estimadas pelo CUBE. O objectivo principal foi o de quantificar a diferença entre as sondas validadas e os modelos batimétricos gerados com o CUBE e avaliar a viabilidade de utilização do CUBE para a cartografia náutica. O processamento dos dados foi executado de forma tradicional e, paralelamente, foi utilizado o CUBE para processar e gerar modelos batimétricos com as especificações da NOAA. Com excepção das áreas de declive acentuado, as diferenças encontradas entre as sondas validadas e as profundidades estimadas pelo CUBE têm uma grandeza inferior a metade da incerteza vertical requerida pela OHI. As potencialidades do CUBE minimizam a subjectividade inerente ao processamento tradicional e tornam o processamento de dados cerca de 33% mais rápido em fundos irregulares e cerca de 67% em fundos regulares. O fluxograma de processamento de dados hidrográficos proposto pretende constituir, actualmente, a abordagem mais eficiente para a criação de produtos de base cartográfica, mantendo, no entanto, sob a responsabilidade do hidrógrafo a designação de sondas mínimas de objectos, ou outras estruturas relevantes para a segurança da navegação, em casos excepcionais em que a modelação batimétrica não garanta os requisitos da cartografia náutica.

Palavras-chave:

Modelação batimétrica, CUBE, Sondadores multifeixe, Incerteza batimétrica, Cartografia náutica.

Abstract

The evolution of acoustic sounding systems imposed on Hydrographic Services new methodologies for interpretation, handling and application of hydrographic information. Taking into account the high data density acquired by multibeam echosounders, some Services were driven to a redefinition of the final product of a hydrographic survey. The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) defined, in 2010, the final product of a hydrographic survey as a bathymetric surface generated from the Combined Uncertainty Bathymetry Estimator (CUBE) algorithm, where depth estimation takes into account observed measurement uncertainties. Currently, at Instituto Hidrográfico (IH), the final product of a hydrographic survey consists of a discrete subset of irregularly spaced minimum soundings (shoals), selected from the full set of validated soundings, as required by the International Hydrographic Organization (IHO). In order to evaluate CUBE processing for nautical cartography purposes, different hydrographic surveys were analyzed. Shoals validated by hydrographers were compared with estimated depths by CUBE. The main objective is to quantify the difference between validated soundings and bathymetric models generated by CUBE and evaluate the feasibility of using CUBE for nautical cartography. Data processing was performed with the traditional methodology and, at the same time, CUBE was used for processing and generating bathymetric models using the NOAA specifications. Except in areas of steep slopes, differences between traditional shoals and CUBE estimated depths are less than half of the vertical uncertainty required by IHO. CUBE capabilities minimize inherent subjectivity in traditional processing, reducing processing times up to 33% on irregular seafloor and about 67% on regular seafloor. The proposed hydrographic data processing flowchart is intended to be the most efficient approach for the creation of cartographic products. Nevertheless, in exceptional cases where bathymetric modeling does not guarantee the requirements for nautical cartography, the responsibility to designate specific minimum soundings or other relevant structures for safety of navigation still rests on the hydrographer.

Keywords:

Bathymetric modeling, CUBE, Multibeam echosounders, Bathymetric uncertainty, Nautical cartography.

Agradecimentos

Em Setembro de 2011 faço 12 anos que rumei de proa certa pelas águas da Hidrografia. Foram 12 anos de trabalho mas também de muito prazer que tive a sorte de partilhar com tantas pessoas, amigos, colaboradores e chefes. Quis o tempo que, contrariamente a outros hidrógrafos da Marinha Portuguesa, não frequentasse o mestrado em Hidrografia no Canadá na Universidade de New Brunswick. Esse mesmo tempo que me presenteou com o comando do N.R.P. “Andrómeda”.

Se outra não houvesse, a presente dissertação seria a prova de que também é possível efectuar investigação científica na área da Hidrografia em Portugal. Para tal, não posso esquecer o apoio, suporte, recursos materiais e, nomeadamente, os dados utilizados e cedidos pelo Instituto Hidrográfico. Da mesma forma, não posso esquecer os instrumentos e o conhecimento científico que a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa me proporcionou ao longo dos últimos dois anos.

Obrigado Comandante Maia Martins por me ter indicado o farol da Hidrografia.

Obrigado Comandantes Ramalho Marreiros e Coelho Gil por toda a confiança que depositaram em mim, ao julgarem-me capaz de operacionalizar os sondadores multifeixe na Brigada Hidrográfica.

Obrigado Comandante Freitas Artilheiro pela amizade, conselhos e conhecimento dos sondadores multifeixe que me tens proporcionado ao longo destes 12 anos.

Obrigado a todos os que trabalharam directamente comigo nos sondadores multifeixe, pela partilha e busca incessante de conhecimento e pela amizade, nomeadamente, ao Comandante Lavajo Brigas, ao Tenente Adolfo Lobo, à Eng.ª Cristina Monteiro e ao Comandante Pinto da Silva.

A presente dissertação teve os contributos directos da Eng.ª Cristina Monteiro no apoio, realização e processamento dos dados do levantamento hidrográfico realizado em Abril de 2011 em Setúbal, da Eng.ª Paula Sanches na discussão dos resultados relativamente à aplicabilidade do CUBE à cartografia náutica, da Eng.ª Leonor Veiga nos cálculos de volumes dragados e consequente discussão de resultados, e do Comandante Pinto da Silva na discussão do controlo de qualidade e incerteza dos L.H.

Um Obrigado ainda ao Dr. Brian Calder pelas respostas aos diversos emails trocados.

Esta já longa lista de agradecimentos não ficaria completa sem reconhecer com elevada estima e consideração a forma com que os meus tutores, Professora Ana Navarro e Comandante Aldino Campos, aceitaram orientar a minha dissertação desde o primeiro minuto sem hesitações e sempre com sugestões que deram sentido e vida ao trabalho desenvolvido.

Por fim, não agradeço mais... apenas reconheço: sem o apoio, sem o afecto e sem a incessante e querida presença na minha alma proporcionada pelos meus Amigos, pela minha Família, sobretudo pela minha querida Mulher, toda esta caminhada ao longo dos últimos dois anos não teria sido igual. Poderia ter-se concretizado na mesma mas, decididamente, não seria a mesma coisa. A vida vale por tudo o que partilhamos, a vida vale pelas forças e energias que nos proporcionamos. Vale a vida quando acreditamos.

Minha Bruna, minha Pitya... Tenho a certeza que o mesmo tempo que tanto tempo nos tirou nos concederá todo o tempo para sorrirmos ao tempo tudo o que a nossa alma nos reservou. A vós vos devo. Amo-vos.

João Vicente

Índice

1.	Introdução	1
2.	A modelação batimétrica	4
2.1	Resolução espacial do sondador	5
2.1.1	Largura do feixe	5
2.1.2	Algoritmo de detecção do fundo e espaçamento das sondas.....	6
2.1.3	Resoluções em distância e angular	8
2.1.4	Densidade de sondagem	10
2.1.5	Incerteza das medições e modelação batimétrica	11
2.2	Requisitos mínimos para os LH	11
2.3	SMF utilizados no IH	12
2.4	Processamento tradicional de dados batimétricos (SMF)	15
2.5	<i>Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator (CUBE)</i>	17
2.5.1	Dados de entrada e funções do CUBE.....	17
2.5.2	Camadas de informação de saída	20
2.6	Resolução e especificações de uma superfície CUBE	21
2.6.1	Resolução da superfície CUBE em função da densidade de dados	21
2.6.2	Especificações da NOAA	21
2.6.2.1	Critérios para a designação de sondas	22
2.6.2.2	Cobertura batimétrica para detecção de objectos	23
2.6.2.4	Parâmetros do CUBE estabelecidos pela NOAA	24
2.6.2.5	A incerteza final da superfície.....	24
2.7	Algoritmos de modelação batimétrica	24
3.	Áreas de estudo, dados adquiridos e metodologia.....	27
3.1	Áreas de estudo e dados adquiridos	28
3.1.1	Fundos regulares: barra do porto de Lisboa	28
3.1.2	Fundos irregulares: Selvagem Grande	29
3.1.3	Fundos mistos: barra do porto de Setúbal	30
3.1.4	Controlo de volumes dragados: canal do Alfeite.....	32
3.2	Fluxograma de processamento de dados	33
3.3	Processamento de dados	35
3.3.1	Modelos batimétricos gerados no processamento do LH de Setúbal	35
3.3.2	Validação dos Modelos Batimétricos (Setúbal)	36
3.3.2.1	Limpeza automática	37
3.3.2.2	Densidade de sondas por nodo	39
3.3.2.3	Camadas de informação do CUBE.....	42
3.3.2.4	Designação de sondas	45
3.3.2.5	CUBE 3	46

3.3.3	Produtos Finais (Setúbal)	47
3.4	Comparação dos MB com os PBF tradicionais do LH	48
4.	Resultados e discussão	50
4.1	Barra do porto de Lisboa	50
4.2	Selvagem Grande	52
4.3	Barra e porto de Setúbal	53
4.3.1	Área Barra	55
4.3.2	Área Outao	58
4.3.3	Área Comercial	60
4.3.4	Comparação das IG dos MB finais com as IG tradicionais	61
4.3.5	Objectos e estruturas relevantes para a navegação	63
4.3.5.1	Área Barra	63
4.3.5.2	Área Outao	63
4.3.5.3	Área Comercial	64
4.4	Avaliação das potencialidades do CUBE	65
4.4.1	Cartografia Náutica	68
4.4.2	Cálculo de volumes e outras aplicações	70
5.	Conclusões e recomendações	73
5.1	Conclusões	73
5.2	Recomendações	74
5.2.1	CARIS	74
5.2.2	CUBE	75
5.2.3	Instituto Hidrográfico	75
5.3	Trabalho futuro	76
	Referências Bibliográficas	77

Lista de Apêndices

APÊNDICE A	Máxima incerteza vertical admissível nos LH
APÊNDICE B	Requisitos de instalação e calibração dos SMF
APÊNDICE C	Controlo de Qualidade do LH de Setúbal
APÊNDICE D	Comparação entre as sondas validadas e as profundidades estimadas

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Área insonificada por um feixe vertical cónico	5
Figura 2.2 - Formação dos feixes nos SMF	6
Figura 2.3 - Conversão do sinal analógico para digital.....	6
Figura 2.4 - Duração do retorno do sinal	6
Figura 2.5 - Algoritmos de detecção do fundo	7
Figura 2.6 - Detecção em fase.....	7
Figura 2.7 - Modo de formação de feixes de elevada densidade	8
Figura 2.8 - Resolução espacial e área insonificada.....	9
Figura 2.9 - Estabilização dos feixes	10
Figura 2.10 - Constituição de um Sistema SMF	13
Figura 2.11 - Processamento tradicional dos dados adquiridos com SMF.....	15
Figura 2.12 - Limpeza automática (<i>Surface Filter</i>).	16
Figura 2.13 - Perfis batimétricos de dunas no Porto de Aveiro.....	16
Figura 2.14 - Processos da função de assimilação.....	18
Figura 2.15 - A função de intervenção.....	19
Figura 2.16 - A função de desambiguação	20
Figura 2.17 - Profundidades estimadas e hipóteses alternativas	20
Figura 2.18 - Designação de sondas.....	22
Figura 2.19 - Sondas distintas existentes numa mesma localização.....	25
Figura 2.20 - Problemática da utilização de um modelo preditivo para estimação das incertezas.....	26
Figura 3.1 - Generalização da informação hidrográfica.	27
Figura 3.2 - Passo da barra sul do porto de Lisboa com realce das estruturas dunares	28
Figura 3.3 - Área sondada nas Selvagens com realce da CN 36407 – Plano A.....	29
Figura 3.4 - Área do LH de Setúbal	31
Figura 3.5 - Espaçamento transversal entre sondas	32
Figura 3.6 - Área de estudo do canal do Alfeite	32
Figura 3.7 - Metodologia adoptada no processamento de dados.....	33
Figura 3.8 - Aspectos da visualização e validação de dados.....	37
Figura 3.9 - Condicionantes da visualização 2D.....	37
Figura 3.10 - Visualização de dados (<i>subset</i> na área Outao).....	38
Figura 3.11 - Limpeza automática	38
Figura 3.12 - Limpeza automática com recurso a um MB de 0,5 m de resolução	39
Figura 3.13 - Limpeza automática com recurso a um MB de 1 m de resolução.....	39
Figura 3.14 - Selecção do MB para a limpeza automática	39
Figura 3.15 - MB 2-DO-Barra-0_5m (parcial).....	40
Figura 3.16 - MB 2-DO-Barra-1m.....	40
Figura 3.17 - MB 2-DO-Comercial-0,5m (profundidade).....	40
Figura 3.18 - MB 2-DO-Comercial-0,5m (densidade de sondas)	41
Figura 3.19 - MB 2-CC-Barra-1m (parcial)	41
Figura 3.20 - MB 2-CC-Barra-2m.....	41
Figura 3.21 - MB 2-CC-Comercial-1m (densidade de sondas).....	42
Figura 3.22 - Confiança nas Hipóteses numa zona dunar	42

Figura 3.23 - Visualização das hipóteses numa zona dunar.....	42
Figura 3.24 - Desvio Padrão e Confiança nas Hipóteses na entrada da Barra.....	43
Figura 3.25 - Visualização das Hipóteses na entrada da Barra.....	43
Figura 3.26 - Número de Hipóteses do MB de 0,5 m de resolução na área Comercial	44
Figura 3.27 - Confiança nas Hipóteses do MB de 0,5 m de resolução na área Comercial	44
Figura 3.28 - Desvio Padrão do MB de 0,5 m de resolução na área Comercial.....	44
Figura 3.29 - Designação de sondas nos MB de Detecção de Objectos.....	45
Figura 3.30 - Designação de sondas nos MB de Cobertura Completa.....	45
Figura 3.31 - Superfície de diferenças <i>Shoal_diff</i> (Barra)	46
Figura 3.32 - Superfície de diferenças <i>Shoal_diff</i> (entrada da Barra).....	46
Figura 4.1 - Diferenças entre o PBF de 2007 e a superfície de resolução 1 m	50
Figura 4.2 - Camadas de informação de profundidade e de desvio padrão	51
Figura 4.3 - Camadas de informação número e confiança nas hipóteses.....	51
Figura 4.4 – Resultados nas Selvagens	53
Figura 4.5 - MB das Selvagens com sobreposição da informação da CN.....	53
Figura 4.6 – Incerteza final dos MB CUBE 4	55
Figura 4.7 – Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível (Barra).....	56
Figura 4.8 – Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível (MB vs IG).....	58
Figura 4.9 - Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível (Outao)	59
Figura 4.10 - Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível (MB vs IG)	59
Figura 4.11 - Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível.....	60
Figura 4.12 - Comparação entre a IG do PBF tradicional e a IG do MBDO.....	61
Figura 4.13 - Comparação entre a IG do PBF tradicional e a IG do MBCC	62
Figura 4.14 - Comparação entre a IG do PBF tradicional e a IG do C-MBDO	62
Figura 4.15 - Comparação entre a IG do PBF tradicional e a IG do C-MBCC	62
Figura 4.16 - Objecto detectado na área da Barra	63
Figura 4.17 - Objectos cúbicos com cerca de 1 m de aresta	64
Figura 4.18 - Falhas na modelação.....	65
Figura 4.19 – Estrutura rochosa com cerca de 20 m de largura.....	65
Figura 4.20 - Irregularidade do fundo vs resolução do MB.....	67
Figura 4.21 - Comparações inadequadas entre os PBF tradicionais e os MB.....	68
Figura 4.22 - Diferenças mais significativas entre o PBF tradicional e os MB da entrada da barra.....	69
Figura 4.23 - Diferenças entre o PBF tradicional e os MB sobre uma duna na área da Barra.....	69
Figura 4.24 - Diferenças entre o PBF tradicional e os MB (estrutura rochosa)	70
Figura 4.25 - Volumes dragados.....	71
Figura 4.26 - Variação do volume calculado com a resolução espacial	71
Figura 4.27 - Faixas 2D numa zona dragada a jusante do cais Comercial (Setúbal)	71
Figura 4.28 - MBDO da área Comercial - zona dragada a jusante do cais Comercial	72
Figura 4.29 - Representação das dunas de pequeno comprimento nos MB	72
Figura 5.1 - Importância do declive no <i>Surface Filter</i>	74
Figura 5.2 - Geração de produtos de base cartográfica.....	76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Dados adquiridos no passo da barra sul de Lisboa	4
Tabela 2.2 – Requisitos mínimos dos LH.....	12
Tabela 2.3 – Especificações técnicas dos SMF da Kongsberg em uso no IH.....	14
Tabela 2.4 – Resolução espacial do SMF EM 710 (1° x 2°).....	15
Tabela 2.5 – Resolução dos MBDO	23
Tabela 2.6 – Resolução das superfícies de Cobertura Batimétrica Completa	24
Tabela 3.1 – Informação do LH (engloba o processamento tradicional).	31
Tabela 3.2 – MB elaborados e resoluções utilizadas	36
Tabela 4.1 – Resultados da comparação entre o PBF de 2007 e as superfícies CUBE 3	50
Tabela 4.2 – Comparação entre as superfícies CUBE 4 e o PBF da Selvagem Grande	52
Tabela 4.3 – Resultados da BASE QCReport sobre a CUBE 3 (MBDO)	54
Tabela 4.4 – Resultados da BASE QCReport sobre a CUBE 3 (MBCC)	54
Tabela 4.5 – Comparação do PBF tradicional com os MB (área Barra).....	56
Tabela 4.6 – Comparação das sondas das IG com os MB (Barra).....	57
Tabela 4.7 – Comparação do PBF tradicional com os MB (Outao).....	58
Tabela 4.8 – Comparação das sondas das IG com os MB (Outao).....	59
Tabela 4.9 – Comparação do PBF tradicional com os MB (Comercial)	60
Tabela 4.10 – Comparação das sondas das IG com os MB (Comercial).....	60
Tabela 4.11 – Comparação das sondas designadas com os MB (Outao)	63
Tabela 4.12 – Comparação das sondas designadas com os MB (Comercial)	64
Tabela 4.13 – Critérios para investigação	67
Tabela 4.14 – Volumes calculados (m ³) para as superfícies CUBE (inicial e validada) e PBF.....	70

Lista de Acrónimos e Abreviaturas

BAG	<i>Bathymetric Attributed Grid Object</i>
CEN.....	Carta Electrónica de Navegação
CG.....	Centro de Gravidade
CN.....	Carta Náutica
CNCG	Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia
CUBE.....	<i>Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator</i>
DGPS.....	<i>Differential Global Positioning System</i>
DJ	Dia Juliano
ETRS	<i>European Terrestrial Reference System</i>
FPM.....	<i>Field Procedures Manual</i>
GPS.....	<i>Global Positioning System</i>
GGPS	<i>Geodetic Global Positioning System</i>
GRS80.....	<i>Geodetic Reference System</i>
HIPS.....	<i>Hydrographic Information Processing System</i>
HSSD.....	<i>Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables</i>
IG.....	Implantação Gráfica
IH.....	Instituto Hidrográfico
IODA.....	<i>Intelligent Outlier Detection Algorithm</i>
ISO.....	<i>International Organization for Standardization</i>
LH	Levantamento Hidrográfico
LIDAR.....	<i>Light Detection And Ranging</i>
LINZ	<i>Land Information New Zealand</i>
MB.....	Modelo Batimétrico
MBCC.....	Modelo Batimétrico de Cobertura Completa
MBDO.....	Modelo Batimétrico de Detecção de Objectos
MN	Marca de Nivelamento
MNE	Modelo numérico de elevações
MRU	<i>Motion Reference Unit</i>
NM	Nível Médio adoptado
NOAA.....	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NOS	<i>National Ocean Service</i>
NRP.....	Navio da República Portuguesa
OHI	Organização Hidrográfica Internacional

ONSWG	<i>Open Navigation Surface Working Group</i>
PBF	Produto Básico Final
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SIS	<i>Seafloor Information System</i>
SMF	Sondador Multifeixe
SVP	<i>Sound Velocity Profiler</i>
TIN.....	Malha Triangular Irregular
TWTT.....	<i>Two Way Travel Time</i>
UAM.....	Unidade de Apoio à Marinha
USACE.....	<i>United States Corps of Engineers</i>
VNS.....	<i>Volumetric Navigation System</i>
VPS.....	Velocidade de Propagação do Som
ZH.....	Zero Hidrográfico

1. Introdução

O uso do mar tem evoluído nos últimos anos de uma forma assinalável, seja pelo aumento do tráfego marítimo em si, seja devido a outros sectores da sociedade, tais como o das energias renováveis e o das actividades de lazer e de turismo. Como resultado, a gestão das infra-estruturas marítimas tem evoluído para uma gestão mais operacional de modo a garantir a segurança da navegação e a optimização dos seus recursos e espaços. A comunidade internacional tem acompanhado esta evolução e, conseqüentemente, têm surgido diversos grupos de trabalho com o objectivo de definir requisitos, regras e procedimentos para a próxima geração de produtos de navegação marítima. O projecto ARIADNA¹ adoptou um conceito idêntico ao da navegação aérea, afirmando a necessidade de cada navio passar a ser representado num sistema de navegação por um volume variável no tempo² (navegação 4D), função da combinação de vários factores³, que possibilite uma análise e gestão de riscos mais eficiente. Um dos factores é a informação de navegação, mais precisamente, o conceito de superfície de navegação associada à informação batimétrica, abordado por Smith *et al.* (2002) e desenvolvido pelo *Open Navigation Surface Working Group* (ONSWG). Uma superfície de navegação é reservada a um produto *Bathymetric Attributed Grid Object* (BAG) construído para fins de segurança da navegação (ONSWG, 2006). No entanto, nem todos os produtos BAG são superfícies de navegação. Uma BAG⁴ é um formato de dados geoespaciais de um modelo numérico de elevações (MNE) definido por uma rede quadrangular (*grid*) de nodos, de génese hidrográfica com valores de incerteza e metadados associados.

O conceito de superfície de navegação tem vindo a ser desenvolvido nos Serviços Hidrográficos, tendo a Organização Hidrográfica Internacional (OHI) publicado, em 2010, a base normativa referente a este tipo de produtos, denominada S-100 (*Universal Hydrographic Data Model*). Esta norma tem como objectivo reunir um conjunto de especificações para as diversas fontes e produtos de dados de natureza hidrográfica, incluindo os dados possíveis de serem representados sob a forma de superfície batimétrica, nomeadamente, os dados oriundos de sistemas capazes de produzir elevadas densidades de dados, tais como os sondadores multifeixe (SMF) ou o LIDAR⁵ e, sobre os quais é possível modelar as incertezas nas medições. A S-100⁶ (OHI, 2010a) define uma superfície de navegação como um conjunto de dados que representam a batimetria com incerteza associada, e que inclui as capacidades de manipulação, combinação e uso em diversas tarefas, incluindo as relacionadas com a segurança da navegação.

A definição de incerteza assume, neste contexto, um papel fundamental. A definição de incerteza dada pela OHI (2008), deriva da definição da *International Organization for Standardization* (ISO), sendo o intervalo em torno de um valor de profundidade, que contém o valor medido num específico nível de confiança. A importância deste conceito, deve-se por, na Hidrografia, ser quase impossível

¹Projecto iniciado em 01/11/2009 com financiamento parcial da União Europeia. A informação sobre o projecto está disponível em <http://www.ariadna-fp7.eu/overview-0>.

²Designado *Maritime Volumetric Navigation System* (VNS).

³Características técnicas, operacionais, posição e atitude do navio; condições ambientais; informação de navegação; integração nos sistemas de controlo e de navegação e factores humanos.

⁴<http://www.opennavsurf.org/presentations.html>.

⁵LIDAR é o acrónimo de *Light Detection And Ranging*, designado na terminologia portuguesa por sistema hidrográfico laser aerotransportado.

⁶A BAG foi o primeiro passo na criação de um produto *grid* de natureza hidrográfica, no entanto, tinha a limitação inicial de apenas permitir uma única resolução espacial dos dados. Actualmente, têm surgido novos trabalhos para criar superfícies com resoluções variáveis no espaço. Um desses exemplos é a proposta de especificações elaborada pelo *Transfer Standard Maintenance and Application Development Working Group* (TSMAD) disponível em http://www.iho-ohi.net/mtg_docs/com_wg/TSMAD/TSMAD20/TSMAD20_DIPWG2-18C_Proposed_S-102_Product_Specification.pdf.

comparar o valor medido com o valor verdadeiro. O conceito de profundidade, de acordo com Instituto Hidrográfico (2008a), reserva-se a valores obtidos depois de efectuadas as devidas correcções em pós-processamento e relacionados com o datum vertical. O conceito de sonda serve para referir, de forma genérica, uma medição de profundidade.

Actualmente, no Instituto Hidrográfico (IH) e de acordo com Monteiro *et al.* (2010), o produto básico final (PBF) de um levantamento hidrográfico (LH) é constituído por um subconjunto discreto de sondas mínimas espaçadas de forma irregular, extraído do conjunto total de sondas validadas, seguindo as recomendações e os requisitos definidos pela OHI.

Na revisão de 2010 dos seus documentos relativos aos LH⁷, a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) publicou uma alteração significativa ao PBF dos LH. Estes documentos, na opinião do autor, constituem um marco histórico na Hidrografia por terem introduzido a superfície batimétrica como PBF de um LH obrigando, para tal, à utilização de algoritmos com estimação de incerteza batimétrica. De acordo com a NOAA (2010b), uma sonda é uma medição de elevação desde a superfície do mar até ao fundo marinho utilizando uma metodologia própria (sondador, fio de prumo, LIDAR, etc.). Uma sonda pode ser corrigida da velocidade de propagação do som (VPS) na água, imersão do transdutor e maré, mas constitui somente o produto de uma ou mais medições. Uma profundidade representa um valor processado de elevação do solo marinho relativo a um datum vertical e retratado num produto final (superfície) de um LH, determinado a partir de análise estatística e com valores de incerteza estimados a partir de um conjunto de sondas.

Os actuais SMF permitem a busca total do fundo a uma taxa elevada de aquisição de dados, conduzindo à construção de MNE de elevada resolução. Actualmente, o processamento tradicional de dados tornou-se inviável face à quantidade e densidade de informação recolhida. Ao longo dos últimos anos, foi necessário incluir processos automatizados de validação de dados, sendo que a sua maioria passa pela utilização de superfícies batimétricas de malha regular.

A necessidade de cumprir com os objectivos das normas ISO, relativamente à quantificação da incerteza, e de garantir as especificações definidas pela OHI para a segurança da navegação, fez com que, das várias abordagens à validação de dados SMF, o algoritmo *Combined Uncertainty Bathymetry Estimator* (CUBE), apresentado por Calder (2003), se impusesse e fosse implementado na maioria das aplicações relacionadas com o processamento de dados hidrográficos. A NOAA (2010a) estabelece ainda um conjunto de parâmetros e especificações para o CUBE, em função da resolução das superfícies batimétricas e dos objectivos dos LH.

Ao confrontar estas novas directrizes da NOAA com as actuais especificações de cartografia náutica definidas pela OHI (2010b), segundo as quais devem ser publicadas as sondas mínimas representativas que garantam a segurança da navegação, surge o paradigma da sonda mínima. Se por um lado, os hidrógrafos têm a responsabilidade de efectuar uma validação de dados hidrográficos que assegurem a segurança da navegação, por outro, no âmbito das novas perspectivas e conceitos, poderá um produto de base MNE criado a partir de métodos probabilísticos, de interpolação e/ou suavização, ser considerado como garantia da segurança da navegação, mesmo que, no caso do CUBE, seja sua pretensão a estimação da profundidade de maior confiança para representação do fundo? As especificações da NOAA relativas aos LH constituem a génese da imposição das superfícies batimétricas face às sondas mínimas seleccionadas pelo hidrógrafo. Conjugando as potencialidades do CUBE com as novas especificações da NOAA, a modelação

⁷Designados *Field Procedures Manual* (FPM) e *Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables* (HSSD). À data da entrega da dissertação a NOAA já tinha publicado a revisão de 2011 dos documentos referidos (NOAA, 2011a; NOAA, 2011b). No entanto, ao longo da dissertação mantém-se a referência aos documentos de 2010 por estes terem referido, pela primeira vez, requisitos para a modelação batimétrica e, por nos documentos de 2011, nada de relevante ter sido alterado relativamente ao assunto.

batimétrica passa a ser uma ferramenta essencial ao controlo de qualidade, ao processamento e à validação de dados de profundidade.

A elevada taxa de aquisição de dados dos SMF inviabiliza a análise individual de todas as sondas adquiridas de forma adequada mas, por outro lado, permite efectuar a modulação batimétrica com um elevado nível de confiança. Conhecendo as incertezas associadas a cada medição, será mais correcto estimar um valor de profundidade para uma localização do modelo ou, seguir os processos tradicionais, em que as profundidades são seleccionadas de forma subjectiva e conservativa? Esta é a génese do CUBE, por um lado permitir uma maior rapidez no processamento e validação de dados, por outro, permitir a estimação de profundidades assente em critérios estatísticos e mensuráveis.

A presente dissertação tem como objectivo principal avaliar a potencialidade das superfícies CUBE e a sua aplicabilidade aos objectivos dos LH, nomeadamente, na cartografia náutica. Mais concretamente, é objectivo do presente trabalho avaliar a possibilidade de se efectuar uma validação semi-automática de dados batimétricos e, conseqüentemente, avaliar a possibilidade de utilizar esta superfície batimétrica como produto base para a cartografia náutica em detrimento da selecção tradicional de sondas mínimas.

Para alcançar o objectivo proposto, surgiu a necessidade de definir um novo fluxograma para o processamento e validação de dados adquiridos com os sistemas SMF, que permita a geração de superfícies batimétricas que possam ser utilizadas no âmbito da cartografia náutica. De modo a obter resultados abrangentes do processamento com o CUBE, especificamente em diversas configurações de fundo marinho, três áreas de estudo foram analisadas:

- Passo da barra sul do porto de Lisboa, área de fundos regulares e de baixas profundidades;
- Área envolvente à Selvagem Grande, área de fundos irregulares com profundidades muito variáveis (entre os 5 m e os 1600 m, aproximadamente);
- Barra e porto de Setúbal, área de diferentes configurações de fundo e de baixas profundidades.

O fluxograma de processamento de dados adquiridos com sistemas SMF foi ainda utilizado numa quarta área, uma zona do canal do Alfeite (acesso à Base Naval de Lisboa), com o objectivo secundário de avaliar a aplicabilidade das superfícies CUBE para controlo e monitorização do cálculo de volume dragado.

Contextualizado o tema da dissertação, no Capítulo 2 efectua-se o resumo do estado da arte da modelação batimétrica com relevância para o processamento de dados dos SMF e, tendo em atenção, as características dos sondadores, a resolução espacial dos equipamentos, a teoria do CUBE e os requisitos dos LH. Referem-se ainda os requisitos da OHI, no que concerne à máxima incerteza admissível, e os da NOAA relativamente às características dos Modelos Batimétricos (MB). No Capítulo 3 apresentam-se as áreas de estudo e é descrita a metodologia utilizada para avaliar as potencialidades do CUBE no processamento de dados adquiridos com SMF, com realce para as etapas do fluxograma definido. O Capítulo 4 apresenta os resultados do trabalho desenvolvido e a conseqüente discussão. Por último, no Capítulo 5 são enunciadas as conclusões e tecidas algumas recomendações.

Acredita-se na importância e utilidade pública desta dissertação, cujo alcance se revê na definição de novos requisitos para a execução de LH. A potencialidade dos dados provenientes de SMF, assim como, a necessidade da partilha e disponibilização de informação geoespacial entre organizações, implica a criação de um produto de base cartográfica que, simultaneamente, sirva o vasto conjunto de aplicações da informação hidrográfica.

2. A modelação batimétrica

Os LH evoluíram imenso nos últimos anos, resultado da evolução tecnológica nos mais diversos níveis, nomeadamente, no hardware (com o significativo aumento da capacidade de processamento dos sistemas), nas técnicas de aquisição (com o aumento da densidade das medições) e, conseqüentemente, no processamento e validação dos dados (com o desenvolvimento de novas metodologias e algoritmos). Por outro lado, a complexidade inerente às novas tecnologias e o volume crescente de dados, observável na Tabela 2.1, tornou impossível a validação dos dados sem recurso a processos automáticos. A Tabela 2.1 indica as sondas adquiridas por impulso de um sondador de feixe simples genérico e de vários modelos de SMF do fabricante Kongsberg Maritime, doravante designado por Kongsberg. Os dados apresentados referem-se à área do passo da barra sul do porto de Lisboa, definida por uma faixa de 675 m de largura por 5400 m de comprimento.

Tabela 2.1 – Dados adquiridos no passo da barra sul de Lisboa⁸

Sondador	Sondas por impulso	Sondas adquiridas	Espaço em disco
Feixe simples (Fiadas espaçadas 50 m)	1	80000	8 MB
SMF EM 950 (obsoleto)	64	5000000	500 MB
SMF EM 3000 (descontinuado)	127	25000000	4 GB
SMF EM 3002	160	70000000	14 GB
SMF 3002 (<i>High density</i>)	254	110000000	20 GB

No final do séc. XX, a maioria dos LH eram efectuados com sondadores acústicos de feixe simples que permitem obter perfis batimétricos. No início do séc. XXI, fruto da necessidade de delimitar as plataformas continentais, assistiu-se, a uma corrida tecnológica pela aquisição e uso de SMF. Nos últimos anos, também os sistemas laser aerotransportados têm sido utilizados, nomeadamente, na delimitação das linhas de costa e modelação de zonas ribeirinhas de baixa profundidade.

A utilização generalizada dos SMF levou a que a OHI (2008), a par com outras instituições e organismos, actualizasse as normas para os LH. Por outro lado, a existência crescente de informação batimétrica dos oceanos e a necessidade de partilha dessa mesma informação tem levado a novos compromissos na sua disponibilização. A quantidade de informação batimétrica aumentou de tal forma que, actualmente, é boa prática mantê-la arquivada e disponível em Sistemas de Bases de Dados e/ou Infra-estruturas de Dados Espaciais, tal como sugere a OHI (2009). Todas estas preocupações levaram à criação de grupos de trabalho e de normas⁹ que facilitem o acesso e partilha de dados, tais como o caso da directiva INSPIRE¹⁰.

Na prática comum dos hidrógrafos, após o processamento e a validação dos dados adquiridos, são seleccionadas as sondas mínimas para representação na CN, seguindo as recomendações definidas pela OHI. Com base nas sondas mínimas, são gerados MNE de malha triangular irregular (TIN), dos quais são extraídas as isóbatas. O princípio inerente é o da preservação das sondas mínimas, essencial para a segurança da navegação. Noutras aplicações, como por exemplo o controlo de operações de dragagem, a prática internacional é mais variada, com a utilização de TIN ou de malhas regulares. No entanto, de acordo com a FIG (2010) ou o USACE (2002), existe uma preferência pelo uso de um valor médio. Em estudos de dinâmica sedimentar ou de caracterização oceanográfica, a preferência é dada à modelação com recurso a algoritmos probabilísticos, que permitam modular a dependência espacial do fenómeno a estudar.

⁸LH efectuado pelo IH duas vezes por ano, por solicitação da Administração do Porto de Lisboa.

⁹Exemplos: <http://www.iso.org>; <http://www.opengeospatial.org>.

¹⁰<http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>.

2.1 Resolução espacial do sondador

Uma superfície batimétrica corresponde a uma representação espacial de dados de profundidade. Torna-se evidente que, para os sondadores acústicos, a resolução espacial decresce rapidamente com o aumento da profundidade. O desempenho dos SMF vai além da capacidade de efectuarem medições de profundidade. Actualmente, o desenvolvimento tecnológico destes equipamentos passa pela discriminação de objectos no fundo do mar e pela caracterização de afloramentos rochosos ou de estruturas dunares. Todas estas estruturas podem possuir dimensões bem diferentes, cuja identificação ao nível de um MB depende da resolução espacial do sondador. Esta é de extrema importância na interpretação dos dados e é função, numa primeira análise, da largura do feixe, do espaçamento das sondas e do algoritmo de detecção do fundo (Hughes Clarke, 2011).

2.1.1 Largura do feixe

Usualmente, os sondadores acústicos são caracterizados, em termos de desempenho, pela frequência e pela largura do feixe. Relativamente à largura do feixe, e de acordo com OHI (2005), a área insonificada por um sondador de feixe simples (feixe cónico) de diâmetro (d) é expressa na Equação 1, sendo delimitada pela abertura do feixe (ϕ) e pela profundidade média (z). A Figura 2.1 ilustra o aumento do diâmetro da área insonificada em função do aumento da profundidade e da abertura do feixe.

$$d = 2 z \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$



Figura 2.1 - Área insonificada por um feixe vertical cónico

Nos SMF o feixe transmitido possui uma grande abertura transversal (bombordo - estibordo) e uma pequena abertura longitudinal (proa - popa). Na recepção, os feixes têm uma grande abertura longitudinal e uma pequena abertura transversal. A largura do feixe formado é determinada pelo produto da largura do feixe de transmissão (impulso) pela largura do feixe de recepção (eco), tal como ilustrado na Figura 2.2. Em resultado desta geometria, cada feixe formado tem pequenas aberturas em ambas direcções.

Assim, pode afirmar-se que a máxima resolução de um MB construído a partir de dados de SMF é definida pela dimensão da área insonificada do feixe formado, ou seja, projectando a sua dimensão espacial no fundo marinho, sobre o ângulo de incidência de cada feixe.

No entanto, a resolução espacial tem de ser equacionada em duas direcções, transversal e longitudinalmente. A área insonificada por cada feixe corresponde, aproximadamente, a uma elipse (OHI, 2005). Considerando um fundo plano e horizontal, o comprimento da elipse na direcção transversal à linha de proa é dado, aproximadamente, por (a_y) na Equação 2, em que (z) é a profundidade média, (β) é o ângulo de incidência do feixe e (ϕ_r) a largura do feixe formado na recepção na direcção transversal à proa da embarcação (OHI, 2005).

$$a_y = \frac{2z}{\cos^2(\beta)} \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \tag{2}$$

Para um fundo plano, a largura da área insonificada (a_x) na direcção proa - popa, é dada, aproximadamente, pela Equação 3, em que (ϕ_t) é a largura do feixe transmitido (OHI, 2005).

$$a_x = \frac{2z}{\cos(\beta)} \tan\left(\frac{\phi_t}{2}\right) \tag{3}$$

A Figura 2.2 ilustra ainda a largura e comprimento da área insonificada para um feixe de $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ de abertura angular nos ângulos de incidência 0° e 60° .

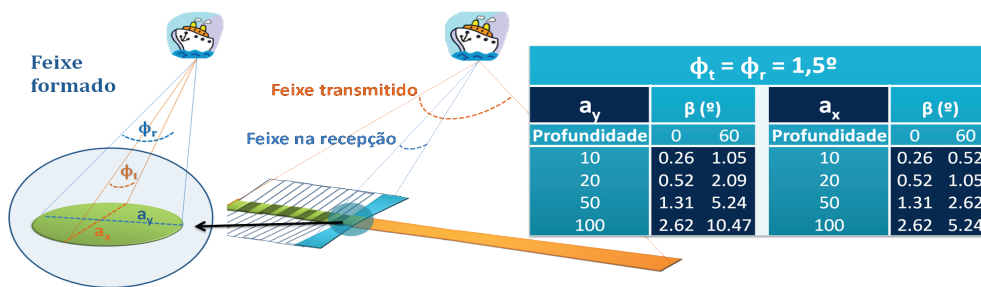


Figura 2.2 - Formação dos feixes nos SMF

2.1.2 Algoritmo de detecção do fundo e espaçamento das sondas

Nos SMF, o transdutor emite um impulso na direcção do fundo e inicia um período de escuta do eco proveniente da reflexão no fundo. O sinal de retorno (analógico) é amostrado em tempo (digital) para cada ângulo de incidência (Figura 2.3). A duração do retorno do sinal e, conseqüentemente, o número de amostras por feixe aumenta com o ângulo de incidência (Figura 2.4).

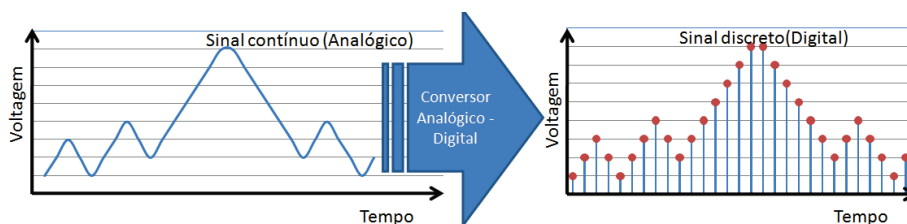


Figura 2.3 - Conversão do sinal analógico para digital

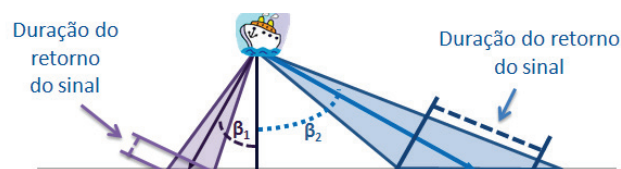


Figura 2.4 - Duração do retorno do sinal¹¹

¹¹Adaptado de OHI (2005).

Nos SMF são utilizados métodos de detecção do fundo para determinar o instante de chegada e a amplitude do sinal acústico. Estes métodos são classificados em duas categorias: detecção em amplitude, utilizada para ângulos de incidência pequenos, e a detecção em fase (interferometria), utilizada para ângulos de incidência elevados (OHI, 2005).

O tempo de viagem do sinal, com um determinado ângulo de incidência, é definido pela amplitude detectada no sinal reflectido no fundo (OHI, 2005). Para ângulos de incidência próximos da vertical, a detecção do fundo corresponde ao primeiro retorno dentro do feixe, designado frente de onda do sinal reflectido (OHI, 2005). Com o aumento do ângulo de incidência, o sinal reflectido perde a sua forma acentuada, sendo necessário observar a variação da intensidade das amostras ao longo da célula insonificada. Assim, pode ser considerado o valor máximo de uma média móvel (ponto A na Figura 2.5) ou o centro de gravidade do sinal reflectido (ponto B na Figura 2.5).

A detecção em amplitude é o método utilizado na detecção do eco para os feixes em que a amplitude da retroreflectividade apresenta valores mais elevados e quando o número de amostras é reduzido. Para os feixes exteriores, a retroreflectividade decresce e o número de amostras aumenta. Assim, o retorno em amplitude torna-se diluído no tempo sendo necessário empregar técnicas de interferometria (OHI, 2005).

Na detecção em fase, para cada feixe formado o transdutor é dividido em dois sub-agregados (designados A e B na Figura 2.6). Cada sub-agregado forma um feixe numa direcção predeterminada. A sequência de valores da diferença de fase é utilizada para estimar o instante de chegada do eco na direcção do feixe formado na recepção, através da determinação da diferença de fase nula da série observada (deMoustier, 1993). Uma recta linear ou um polinómio de segunda ordem pode ser ajustado a um subconjunto da série de diferenças de fase do sinal recebido nos dois sub-agregados para refinar a determinação do instante correspondente à diferença de fase nula (pontos C, D, E e F na Figura 2.5). Quando o eco chega na direcção do eixo acústico, o sinal nos dois sub-agregados encontra-se em fase, sendo este o instante de chegada do eco.

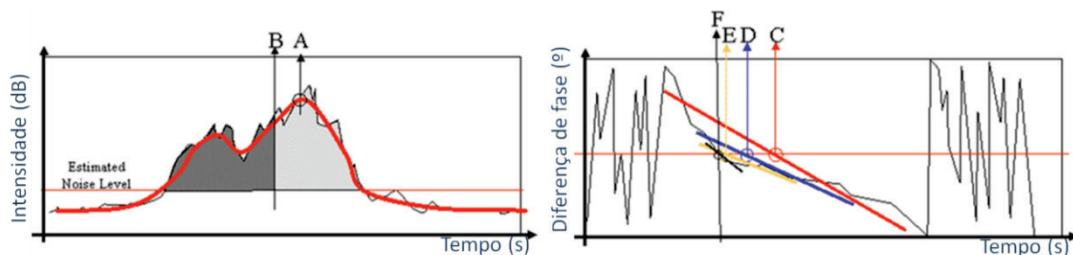


Figura 2.5 - Algoritmos de detecção do fundo¹²

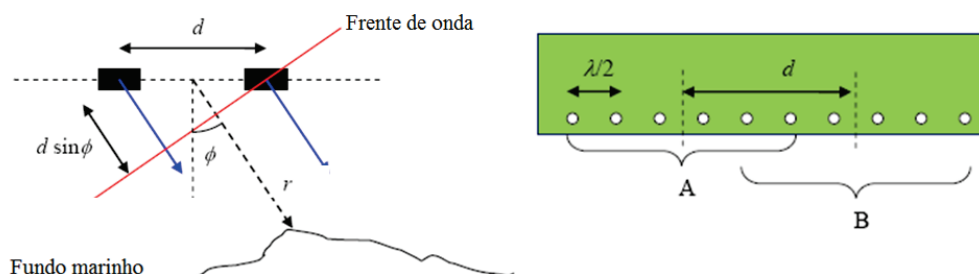


Figura 2.6 - Detecção em fase¹³

¹²Adaptado de Kongsberg (2007).

¹³Adaptado de Kongsberg (2007).

Ao longo da faixa sondada é necessária uma combinação de detecção em amplitude e fase para a determinação consistente do tempo de trajecto do impulso.

De acordo com deMoustier (1993), no caso de uma detecção em amplitude a resolução de um MB não pode ser menor do que a área insonificada.

No caso da detecção em fase, quanto maior o ângulo de incidência maior o tempo de escuta do eco e maior será o número de amostras de sinal. Este facto, converte-se na possibilidade de, transversalmente, se poder aumentar as subdivisões da área insonificada e, conseqüentemente, a fase (logo, a detecção de variações de perfil) poder ser determinada com uma resolução superior à resolução da faixa insonificada, ou seja, cada feixe pode ser subdividido em vários feixes formados electronicamente (Hughes Clarke, 2011). Esta técnica é utilizada para aumentar o número de sondas adquiridas por feixe transmitido (Figura 2.7).

Transversalmente, o espaçamento das sondas adquiridas é, então, função do modo de formação dos feixes, podendo ser equiangular (sondas regularmente espaçadas em função de um ângulo), equidistante (sondas regularmente espaçadas) ou de elevada densidade. Este último utiliza uma combinação dos dois modos anteriores, de forma a adquirir o máximo de sondas, ou seja, o menor espaçamento entre sondas possível. Assim, na direcção transversal à embarcação de sondagem, os valores apresentados na Figura 2.2 para o ângulo de incidência de 60° para (a_v) determinados a partir da Equação 2 podem ser reduzidos, para grandezas da ordem dos feixes formados em ângulos de incidência próximos da vertical (Kongsberg, 2004b).

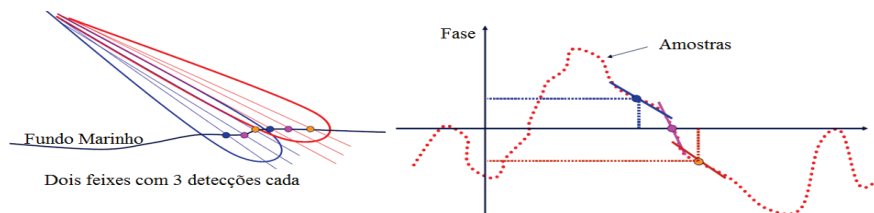


Figura 2.7 - Modo de formação de feixes de elevada densidade¹⁴

Longitudinalmente, a questão é mais prática mas de maior dificuldade de resolução. A resolução longitudinal só depende da largura do feixe, da profundidade e do declive do fundo (Hughes Clarke, 2011).

2.1.3 Resoluções em distância e angular

A área insonificada por um feixe refere-se à energia proveniente do lóbulo principal produzido na formação dos feixes (Hughes Clarke, 1996). Segundo o autor, a parte principal de um feixe é definida pela largura de feixe correspondente a metade da intensidade máxima ao longo do eixo acústico, ou seja, pela expressão da Equação 4, -3 dB. Este valor define a largura do feixe do lóbulo principal.

$$10 \log\left(\frac{1}{2}\right) = -3 \text{ dB} \quad (4)$$

A resolução espacial de um SMF é determinada pela largura do feixe e pela largura de banda do impulso transmitido. De acordo com deMoustier (2004), a largura de banda é o factor dominante da resolução em distância (ΔR), sendo esta, expressa na Equação 5 onde (C) representa a VPS na água e (B_w) a largura de banda do impulso.

¹⁴ Adaptado de Kongsberg (2007).

$$\Delta R = \frac{C}{2B_w} \quad (5)$$

A resolução em distância traduz a capacidade de um sistema em discriminar ecos adjacentes. Em regra, a largura de banda de um transdutor é cerca de 10 % da frequência de operação, o que associa, os transdutores de frequência mais elevada às melhores resoluções em distância.

Segundo o mesmo raciocínio, a resolução angular (deMoustier, 2004) traduz a capacidade de um SMF discriminar ecos vindos de ângulos adjacentes. Na equação 6, ($R\theta$) é a resolução angular, (F) a frequência e (L) o comprimento do transdutor.

$$R\theta = \frac{C}{FL} \quad (6)$$

Quando relativa à largura do feixe (θ), a resolução angular pode ser expressa pela Equação 7, em que λ é o comprimento de onda do impulso e 0,88 é um termo aproximado quando $L > 4\lambda$ (deMoustier, 2004).

$$R\theta \approx \theta = 0,88 \frac{\lambda}{L} \quad (7)$$

Na Figura 2.8, a área insonificada (AE) por um feixe formado, dada na Equação 8 (deMoustier, 2004), é o produto da resolução em distância (ΔR) projectada num plano horizontal por uma extensão equivalente à resolução angular ($R\theta$) no mesmo plano, segundo um determinado ângulo (ω). Na Equação 8, (A) é a altitude, ou seja, a profundidade (z), e (R) a distância inclinada.

$$AE = \left(\frac{\Delta R}{\cos \omega} \right) \times R\theta = \frac{RC^2}{2B_w FL \sqrt{1 - \left(\frac{A}{R} \right)^2}} \quad (8)$$

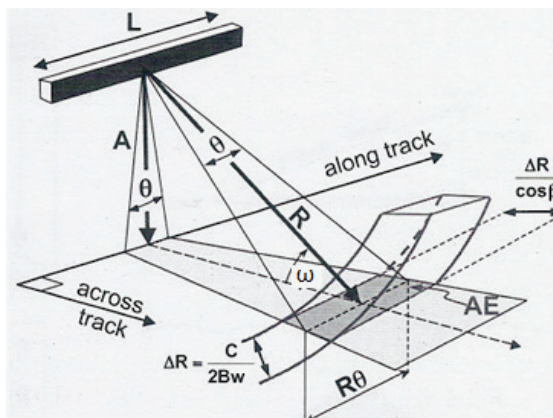


Figura 2.8 - Resolução espacial e área insonificada¹⁵

¹⁵(deMoustier, 2004).

A Equação 8 mostra que a área insonificada por um feixe é proporcional à distância inclinada e inversamente proporcional à frequência, considerando um determinado comprimento do transdutor. Assim frequências mais elevadas potenciam uma melhor resolução espacial.

2.1.4 Densidade de sondagem

A densidade de sondagem (isto é, o número de sondas adquiridas por unidade de área) é uma função da dimensão das áreas insonificadas, do espaçamento transversal dos feixes, da taxa de transmissão dos impulsos, da velocidade da plataforma de sondagem e da atitude da embarcação de sondagem¹⁶. Para se tentar obter a insonificação completa do fundo, as áreas insonificadas por impulsos consecutivos devem ter alguma sobreposição, de tal forma que, qualquer ponto no fundo seja insonificado, no mínimo, por um impulso acústico (Hughes Clarke, 2011).

De modo a otimizar a resolução, a densidade de sondas deve ser a maior possível com uma distribuição espacial uniforme. A taxa de transmissão de impulsos depende fundamentalmente do tempo de trajecto (*two way travel time* – TWTT). Quanto mais larga a faixa sondada maior o tempo de trajecto dos feixes com maior ângulo de incidência e, conseqüentemente, menor a taxa de transmissão de impulsos. Assim, para uma determinada velocidade de sondagem a densidade de sondas diminui com o incremento da faixa sondada. Uma forma de aumentar a densidade de sondas tem sido o desenvolvimento de sondadores com maior largura de banda que permitam ter em permanência dois feixes, transmitidos em frequências ligeiramente diferentes, a viajar simultaneamente na coluna de água (*dual swath*) como o SMF EM 710 (Kongsberg, 2004b).

Relativamente aos movimentos da plataforma, a representação dos feixes exteriores depende das rotações da plataforma e do método de estabilização dos feixes aplicado. O guiamento do feixe pode ser conseguido através da introdução de diferenças de tempo ou de fase nos elementos do agregado e tem dois objectivos: a estabilização do feixe (Figura 2.9) e a formação dos feixes durante a recepção. A estabilização em balanço é essencial para utilizar toda a largura da faixa sondada mas, não afecta a resolução longitudinal. A estabilização em cabeceio torna-se mais importante com o aumento da profundidade. No entanto, o factor que mais afecta a uniformidade do espaçamento das sondas em médios e grandes fundos é a estabilização da proa (Hughes Clarke, 2011). Esta é obtida com a transmissão por sectores.

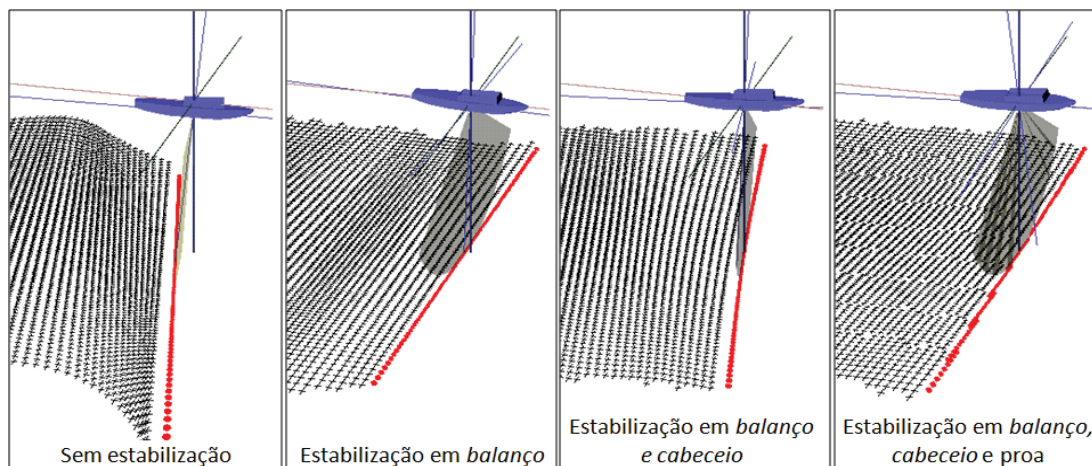


Figura 2.9 - Estabilização dos feixes¹⁷

¹⁶Varição da proa (*yaw*), do cabeceio (*pitch*) e do balanço (*roll*).

¹⁷Adaptado de Hughes Clarke (1996).

2.1.5 Incerteza das medições e modelação batimétrica

Por maior que seja a resolução dos dados de um LH, por si só, não garante a qualidade dos dados hidrográficos. A incerteza de um LH consiste na determinação horizontal e vertical da propagação de todas as incertezas associadas às medições que contribuem para a representação absoluta de uma sonda num determinado sistema de referência. Segundo Artilheiro e Vicente (2009), que adoptaram a metodologia desenvolvida por Hare *et al.* (1995)¹⁸, a estimação da incerteza das medições do SMF, nas componentes vertical e horizontal, tem em consideração as seguintes fontes:

- A localização dos transdutores do sondador, do sensor de movimentos e da antena do posicionamento em relação ao referencial da plataforma de sondagem
- As incertezas na medição dos sensores componentes do sistema, i.e., do sondador¹⁹ (ângulo do feixe e distância oblíqua), da unidade de movimentos (*balanço, cabeceio e arfagem*), do posicionamento, da unidade de determinação da proa, do perfilador da VPS ao longo da coluna de água, do velocímetro de determinação da VPS à face do transdutor e do equipamento utilizado para a leitura da maré
- As condições de operação, nomeadamente, os movimentos da plataforma de sondagem e a variação temporal e espacial do perfil de VPS do som na água

No caso dos modelos batimétricos e da sua resolução, estas incertezas assumem duas formas (Hughes Clarke, 2011). Nas zonas de sobreposição de faixas sondadas existe um erro de correlação entre os dados de diferentes faixas sondadas que se traduz em ruído no modelo. Por outro lado, em zonas em que combinamos diferentes LH as alterações ao fundo marinho apenas são visíveis quando estas são maiores que as incertezas associadas aos diferentes LH.

Se por um lado os fabricantes são unânimes em enfatizar as melhorias ao nível da exactidão relativa de cada sensor, o certo é que, em termos absolutos, estas melhorias nem sempre se traduzem ao mesmo nível. Um bom exemplo é o contributo da diferença em amplitude e em fase da maré, entre o local de sondagem e o local de leitura da maré, para a componente vertical da incerteza.

2.2 Requisitos mínimos para os LH

Os requisitos mínimos para os LH são definidos pela OHI através de *Standards for Hydrographic Surveys* (OHI, 2008), publicação mais conhecida por S-44. A Especificação Técnica “Planeamento, Execução e Processamento de Levantamentos Hidrográficos” é o documento²⁰ nacional de referência (Instituto Hidrográfico, 2008a). Este documento traduz os requisitos mínimos expressos na S-44. Em função da área a sondar e do tipo de navegação esperada, os LH são classificados em quatro ordens (Instituto Hidrográfico, 2008a):

- Ordem Especial: Áreas potencialmente perigosas para a navegação de superfície e onde a navegação típica tem um resguardo ao fundo reduzido. São exemplos os portos e as respectivas aproximações, as zonas de atracação e os canais de navegação. Requer a busca total do fundo.
- Ordem 1a: Áreas em que a profundidade é suficientemente reduzida e, eventuais estruturas no fundo do mar podem constituir uma preocupação para a navegação de superfície

¹⁸Com base nos estudos de Hare, Silva (2009) efectuou um resumo de todas as incertezas associadas aos SMF.

¹⁹A incerteza nas medições do sondador deve-se à incerteza no ângulo do feixe e no percurso do impulso, e depende das características técnicas do sondador, em particular da abertura dos feixes, da duração do impulso e dos métodos de detecção do eco (Hammerstad, 1998).

²⁰Em Portugal, de acordo com a Lei da Cartografia, Decreto-Lei 202/2007 de 25 de Maio, compete ao IH a elaboração das Especificações Técnicas, aplicáveis às entidades que efectuem declaração prévia para o exercício de actividades no domínio da produção de cartografia hidrográfica.

esperada para a área, mas onde o resguardo ao fundo não é tão crítico como nas áreas anteriores. Requer a busca total do fundo.

- Ordem 1b: O conhecimento geral do fundo é considerado adequado para o tipo de navegação esperada.
- Ordem 2: O conhecimento geral do fundo é considerado adequado.

A incerteza vertical é considerada como a incerteza na profundidade reduzida ao datum vertical. As incertezas máximas admissíveis para a medição de profundidades e para o respectivo posicionamento são referidas a um nível de confiança de 95%. A máxima incerteza vertical admissível (μ_{max}) é determinada por aplicação da Equação 9 para cada ordem de LH (OHI, 2008). O factor (a) representa a componente da incerteza que não depende da profundidade. O factor (b) é um coeficiente multiplicativo para a determinação da componente da incerteza variável com a profundidade (z). Estes factores são expressos em função da Ordem do LH (Tabela 2.2).

$$\mu_{max} = \sqrt{a^2 + (b \times z)^2} \quad (9)$$

Tabela 2.2 – Requisitos mínimos dos LH²¹

Ordem	Máxima Incerteza Vertical (m)	Máxima Incerteza Horizontal (m)	Capacidade de Detecção	Máximo Espaçamento entre Fiadas (m)
Especial	a = 0,25 m b = 0,0075	2	Estruturas cúbicas com aresta maior que 1 m.	Não aplicável
1	a a = 0,5 m b = 0,013	5 + 0,05 z	Estruturas cúbicas com aresta maior que 2 m para z ≤ 40 m ou maior que 10% (z) para z > 40m.	(requerida busca total do fundo).
	b		Não aplicável.	Max. (25 m ; 3 x Z _{média})
2	a = 1,0 m b = 0,023	20 + 0,10 z	Não aplicável.	3 x Z _{média}

A S-44 aborda a modelação batimétrica mas relega para os Serviços Hidrográficos a responsabilidade no estabelecimento de procedimentos de validação e controlo de qualidade. Os Serviços Hidrográficos podem e devem, sempre que julguem necessário, ser mais exaustivos na definição de normativos. O Instituto Hidrográfico (2008a) estabelece a sobreposição mínima entre fiadas de sondagem, assim como, o espaçamento máximo entre fiadas de verificação mas, nada refere sobre requisitos/especificações para a modelação batimétrica.

2.3 SMF utilizados no IH

A complexidade de um sistema SMF resulta da sua própria constituição, uma vez que integra diversos componentes. Os sistemas utilizados no IH (Figura 2.10) apresentam a seguinte constituição:

- SMF: constituído por unidades electrónicas de transmissão, recepção e processamento de sinal, transdutores (transmissão e de recepção) e uma unidade de operação
- Módulo Seatex Seapath para integração dos dados de posicionamento com os dados de atitude da embarcação de sondagem. Engloba duas antenas *Global Positioning System* (GPS),

²¹Adaptada de Hidrográfico (2008a). O Apêndice A ilustra os valores de incerteza vertical para diversas profundidades.

receptores de correcções diferenciais *Differential Global Positioning System* (DGPS) e/ou *Real Time Kinematic* (RTK) e um sensor inercial, *Motion Reference Unit* (MRU)

- Sondas para medição da VPS na água à face dos transdutores (*Probe*) e ao longo da coluna de água (*Sound Velocity Profiler* - SVP).

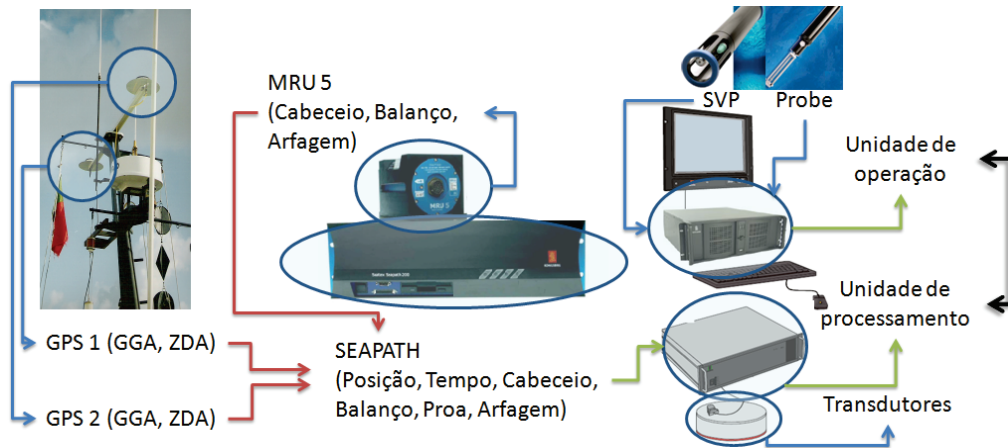


Figura 2.10 - Constituição de um Sistema SMF

A aquisição de dados com SMF requer uma instalação cuidada, desenvolvida no Apêndice B, e da qual se destaca a:

- Determinação dos braços (X, Y, Z) de todos os sensores e da linha de água da embarcação (Z) relativamente ao referencial da embarcação da embarcação de sondagem
- Determinação dos desvios angulares (cabeceio, balanço e proa) do transdutor e do sensor inercial relativamente ao referencial da embarcação
- Determinação do desvio angular em proa entre o vector das duas antenas GPS e a proa da embarcação

A aquisição de dados requer provas de calibração que têm como objectivo a validação dos desvios de angulares anteriormente determinados. A metodologia utilizada na execução das provas de calibração é desenvolvida no Apêndice B. Como regra de trabalho, as parametrizações que respeitam ao sensor de posicionamento e ao sensor de atitude são introduzidas no Seapath, passando os dados de atitude e de posição a estarem referidos à origem do referencial da embarcação. Normalmente, quando conhecido, adopta-se o centro de gravidade (CG) da embarcação como origem. Quando desconhecida a localização do CG, a origem adoptada deve ser a própria localização do sensor inercial, uma vez que, este deve ser instalado na posição mais estável da embarcação (Kongsberg, 2010). Estes dados (posição, balanço, cabeceio, arfagem e proa), são depois transmitidos para a unidade electrónica de processamento do SMF. O controlo desta unidade (Kongsberg, 2010) é efectuado com recurso à aplicação *Seafloor Information System* (SIS) onde são introduzidos os parâmetros de instalação e calibração do transdutor. O SIS utiliza a informação recebida do Seapath e projecta-a para o transdutor, permitindo um correcto guiamento electrónico dos feixes e a compensação, em tempo real, de todos os braços e desvios de instalação e calibração.

Importa evidenciar a importância vital para o sistema SMF do referencial Tempo. O SMF produz uma série de datagramas, cada qual, revelador das medições de cada sensor. Estes datagramas têm de estar assentes num único e igual referencial Tempo. Desta forma, para que não exista latência nas medições nem usos indevidos de horas locais nas unidades de controlo e processamento, é utilizada a hora GPS em todas as medições, sendo o sincronismo em tempo activado por um sinal próprio (*one pulse per second*), entre o Seapath e o SMF.

Nos SMF da Kongsberg, o traçado do raio sonoro e a solução de refração da VPS ao longo da coluna de água é, igualmente, determinada em tempo real (Kongsberg, 2010). A Tabela 2.3 indica as principais características dos SMF em uso no IH. Estes utilizam uma combinação de processamento de sinal digital com focagem dinâmica e técnicas de interferometria dentro de cada feixe formado.

Tabela 2.3 – Especificações técnicas dos SMF da Kongsberg em uso no IH²²

	EM 120	EM 710	EM 3002
N.º sistemas SMF	2	1	2
Frequência (kHz)	12	70 - 100	300
N.º de sondas por impulso transmitido	191	200	160 - 254
Máximo de impulsos por segundo	4	30	40
Largura dos feixes formados ²³	2° x 2°	1° x 2°	1,5° x 1,5°
Largura máxima faixa sondada	140°	150°	130°
Estabilização do feixe (transmissão)	Cabeceio, balanço e proa		Cabeceio
Estabilização do feixe (recepção)	Balanço		
Alcance (m)	50 - 11000	3 - 1600	1 - 120
Taxa de amostragem (kHz)	2 (37 cm)	15 (5 cm)	14 (5 cm)
Comprimento do impulso (ms)	15 - 5 e 2	0,15 – 0,5 e 2 ms (CW) Até 200 ms (FM)	0,15
Resolução em profundidade (cm)	10 – 40	1	

De acordo com Kongsberg (2004a) o EM 120 é um sondador de baixa frequência apropriado para grandes fundos. Utilizando o espaçamento equidistante entre feixes, obtém sondas espaçadas, aproximadamente, de 1% da profundidade (90° de cobertura), 2% da profundidade (120° de cobertura) ou 3% da profundidade (140° de cobertura). Utiliza um comprimento de impulso de 15 ms, 5 ms ou 2 ms, em águas profundas, médias profundidades e para profundidades baixas, respectivamente. O EM 120 é indicado para LH de Ordem 2 e, não é recomendado para profundidades inferiores a 100 m. A incerteza esperada do sistema é função da profundidade (z), sendo de 0,2% de (z) para os feixes formados até aos 45°, 0,3% de (z) para os feixes formados entre os 45° e os 60° e de 0,5 % de (z) para os feixes formados em ângulos superiores a 60°.

Segundo Kongsberg (2004b) o EM 710 foi o primeiro sondador da última geração de sondadores a incorporar melhorias ao nível da construção, permitindo uma largura de banda significativamente maior. Utiliza um sinal modulado na gama de frequências entre os 70 e os 100 kHz, facto que lhe possibilita maior resolução a maiores profundidades. Ao possuir uma largura de banda maior tem a possibilidade de manter na coluna de água dois impulsos de frequência diferente, em simultâneo (*dual swath*), com notáveis incrementos na densidade de sondagem (Tabela 2.4). O sondador EM 710 é adequado para profundidades médias em LH de Ordem 1 e de Ordem 2 (Artilheiro e Vicente, 2009).

De acordo com Kongsberg (2005) o EM 3002 é utilizado em fundos baixos. No modo de espaçamento de sondas de elevada densidade, são formados feixes espaçados de 0,9° nos feixes centrais, decrescendo sequencialmente até aos feixes mais exteriores, para um espaçamento de 0,2° no ângulo de incidência de 65°. O EM 3002 é estabilizado em cabeceio na transmissão e em balanço na recepção. A incerteza esperada do sistema é função da profundidade, do ângulo de incidência e das condições de operação, podendo ser utilizado em LH de Ordem Especial (Artilheiro e Vicente, 2009).

²²Manuais dos equipamentos: Kongsberg (2004a), Kongsberg (2004b) e Kongsberg (2005).

²³Na verdade, a largura do feixe recebido é inversamente proporcional ao co-seno do ângulo de incidência. Assim, por exemplo para o EM 3002, a largura do feixe recebido, é de 2,1° para um feixe recebido no ângulo de incidência de 45° e, de 3° para um feixe recebido num ângulo de incidência de 60°.

Tabela 2.4 – Resolução espacial (m) do SMF EM 710 (1° x 2°)²⁴

Profundidade	Dimensão longitudinal da área insonificada		Distância longitudinal entre impulsos transmitidos (<i>Dual Swath</i>)				Dimensão transversal da área insonificada		Distância entre sondas, função da largura da faixa sondada	
	0°	60°	Faixa sondada	Taxa transmissão de impulsos	4 nós	8 nós	0°	60°	90°	120°
5	0,2	0,4	18	33,6	0,05	0,1	0,2	0,18	0,05	0,09
50	0,9	1,8	180	5,8	0,2	0,3	1,8	1,75	0,5	0,88
100	1,8	4,6	360	3,0	0,3	0,7	3,5	3,51	1	1,75
200	3,5	7,0	720	1,5	0,6	1,3	7,0	7	2	3,5
400	7,0	14,0	1440	0,8	1,3	2,6	14,0	14	4	7
800	14,0	28,0	2300	0,5	2,2	4,3	28,1	28,1	8	14
1600	28,0	-	2300	0,3	3,0	6,1	56,1	-	16	-

2.4 Processamento tradicional de dados batimétricos (SMF)

O IH define na forma de procedimento de trabalho²⁵ as regras para o processamento de dados oriundos de SMF. O processamento é efectuado com recurso à aplicação CARIS-HIPS (CARIS, 2011a) e está esquematizado na Figura 2.11.

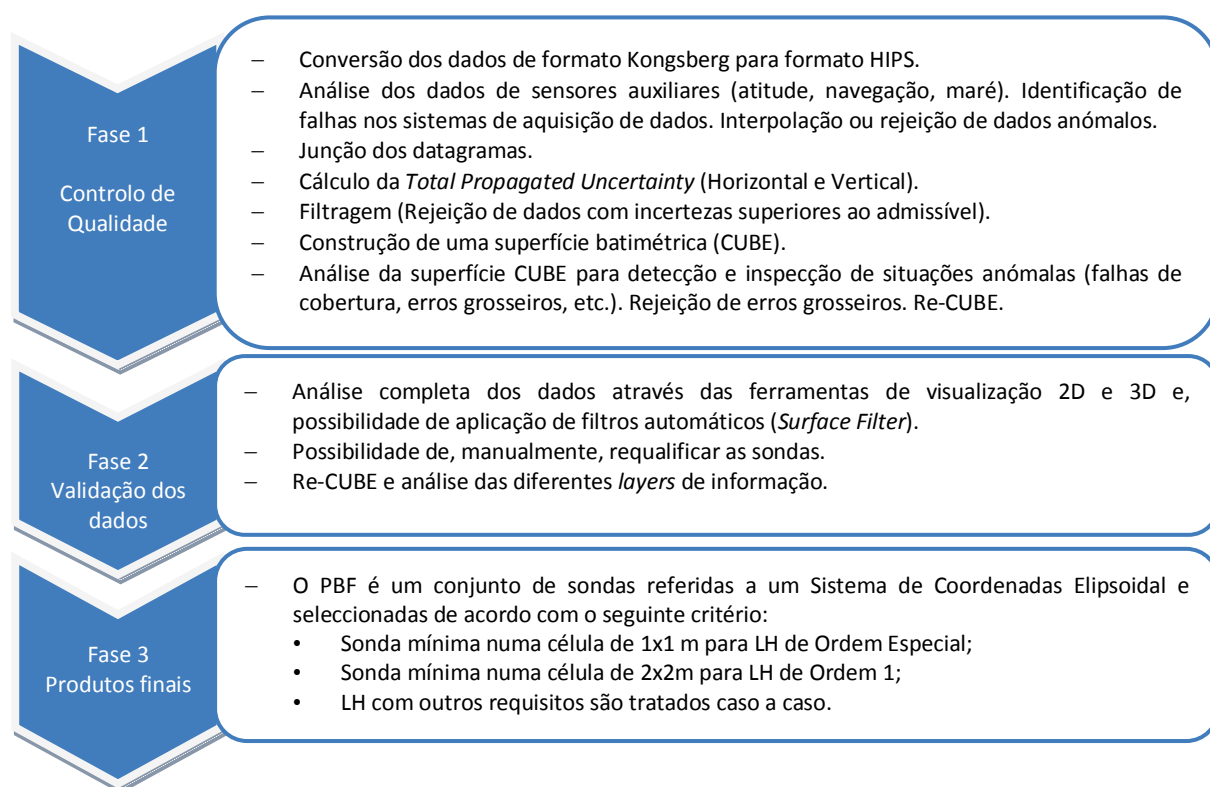


Figura 2.11 - Processamento tradicional dos dados adquiridos com SMF

Os dados adquiridos dos diversos sensores são convertidos para datagramas únicos (sondas observadas, posição, maré, arfagem, balanço, cabeceio, proa) relacionados entre si pelo grupo data - hora. Cada datagrama é analisado e validado individualmente de modo a identificar possíveis falhas

²⁴ Adaptada de Kongsberg (2005).

²⁵ Instituto Hidrográfico, 2008b.

de aquisição ou dados anómalos. Estes podem ser rejeitados ou interpolados. Seguidamente, é efectuada a determinação das incertezas (horizontal e vertical) das sondas observadas com base no modelo de Hare *et al.* (1995) adaptado pela Universidade de New Brunswick (CARIS, 2011a) e, posteriormente, rejeitadas aquelas que possuam incertezas maiores que as admissíveis para a Ordem do LH. Por fim é efectuada a georreferenciação das sondas e a redução de maré.

A segunda fase do processamento de dados corresponde à limpeza automática por comparação das sondas com uma superfície de referência. A Figura 2.12 ilustra o funcionamento do filtro automático (*Surface Filter*). Neste, e de acordo com CARIS (2011a), as sondas que se afastem da superfície referência de uma distância vertical superior a um valor definido, constante ou variável (função da incerteza e/ou do desvio padrão), podem ser rejeitadas de forma automática. Nesta fase, o hidrógrafo recorre ainda à validação manual com recurso a ferramentas de edição e visualização 2D e 3D, na qual pode aceitar ou rejeitar o filtro automático aplicado.

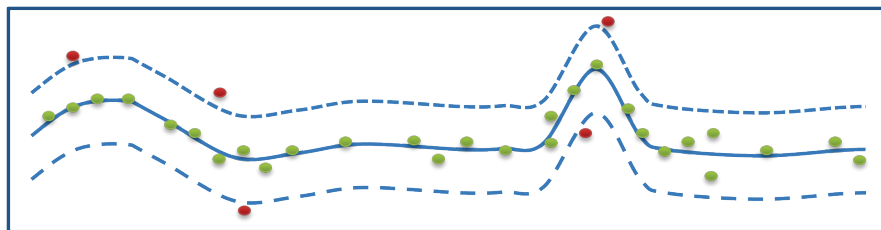


Figura 2.12 - Limpeza automática (*Surface Filter*)

No processamento tradicional o PBF de um LH é um subconjunto discreto de sondas mínimas espaçadas de forma irregular, extraído do conjunto total de sondas validadas, seguindo recomendações e requisitos da OHI. A modelação batimétrica é utilizada como uma ferramenta de limpeza e de controlo de qualidade, permitindo a identificação de erros grosseiros e a eliminação automática de “ruído” e valores anómalos. O processamento tradicional é um processo moroso, baseado num julgamento qualitativo, conservativo e subjectivo, no qual é dada primazia às sondas mínimas em prol da segurança da navegação. Cumpridos os requisitos inerentes a um LH, a maioria dos dados adquiridos tem qualidade para poderem ser utilizados na cartografia. No entanto, é impossível ao hidrógrafo visualizar e validar todos os dados de uma forma coerente. A Figura 2.13 ilustra adequadamente a visão do problema. Numa faixa de 11 por 75 m, qual a sonda relevante para a cartografia náutica, quais as sondas consistentes e quais os valores anómalos ou ruído?

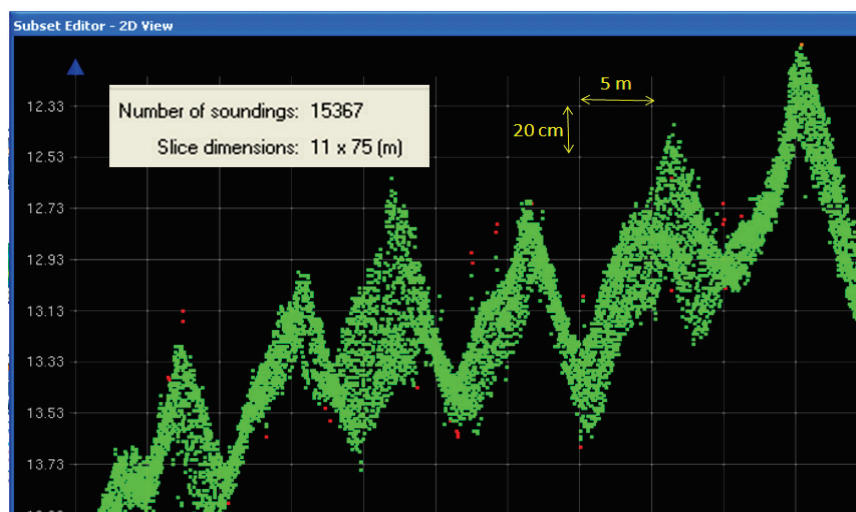


Figura 2.13 - Perfis batimétricos de dunas no Porto de Aveiro

Do ponto de vista da segurança da navegação a tendência será dar primazia às sondas mínimas das cristas dunares ilustradas na Figura 2.13. No entanto, em estudos de dinâmica sedimentar é mais importante a compilação de informação que permita caracterizar o comprimento, altura e declive das dunas. Esta discussão levanta outra questão relativamente ao CUBE, será ele capaz de responder adequadamente a diferentes problemáticas?

2.5 Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator (CUBE)

O CUBE é um algoritmo de modelação batimétrica desenvolvido por Calder (2003) que agiliza o processamento de dados hidrográficos assistido por computador. Tem como objectivo principal estimar a profundidade, em função das medições adjacentes e das respectivas incertezas e, simultaneamente, determinar a incerteza associada a essa estimação. A última versão do manual²⁶ do algoritmo é de 2007. O algoritmo foi desenhado essencialmente para o processamento de dados de SMF mas tem outras áreas de aplicação, como o LIDAR²⁷.

De acordo com Calder e Wells (2007), o CUBE parte de 7 axiomas sobre os quais o algoritmo se desenvolve e dos quais se salientam as seguintes ideias:

- As sondas são, na maioria das vezes, materializações fidedignas do relevo submarino
- Os dados processados pelo CUBE não devem incluir erros grosseiros ou sistemáticos
- O valor de uma sonda depende dos equipamentos utilizados e das características ambientais, ou seja, uma sonda não é uma profundidade
- No CUBE, mediante as mesmas premissas, os resultados finais serão sempre os mesmos, ao contrário da avaliação do hidrógrafo que efectua uma operação de triagem subjectiva
- A diferenciação das sondas faz-se pela estimação da sua incerteza, um valor quantitativo, contrariamente ao processamento humano que faz um julgamento subjectivo

2.5.1 Dados de entrada e funções do CUBE

O CUBE aceita como dados de entrada os atributos da sonda, isto é, o posicionamento horizontal, o valor de sonda e as respectivas incertezas estimadas. Os valores de incerteza são calculados por um modelo preditivo de estimação de incerteza baseado na metodologia desenvolvida por Hare *et al.* (1995) e exemplificada por Artilheiro e Vicente (2009).

O CUBE transforma as sondas numa malha regular de profundidades estimadas, através de três funções básicas: assimilação, intervenção e desambiguação.

A assimilação consiste na atribuição de profundidade e incerteza aos nodos da malha regular, resultado de um processo estatístico de inferência bayesiana descrito em Calder e Wells (2007). Para tal, o algoritmo efectua:

- A compilação das sondas contribuintes para a determinação da profundidade nodal, processo designado por *gathering* e definido por um raio de captura
- A propagação da incerteza vertical associada a cada sonda, processo designado por *scattering* e que serve para colapsar as incertezas 3D de uma sonda numa única dimensão de incerteza, que irá contribuir para a estimação da incerteza vertical dos nodos. As sondas mais próximas de um nodo e as sondas com menores incertezas vertical e horizontal têm mais peso na estimação da profundidade nodal

²⁶ http://ccom.unh.edu/publications/Calder_07_CUBE_User_Manual.pdf.

²⁷ CARIS (2011); Lockhart *et al.* (2008).

O *gathering* (Calder e Wells, 2007) tem por base a determinação do raio de captura (*CaptureDistance*) formulado na Equação 10 e, normalmente, corresponde a uma percentagem da profundidade média (*z*) definida por CD_Scale^{28} . De modo a garantir a assimilação sondas em profundidades muito baixas é necessário o uso de um valor mínimo para o raio de captura, representado por *CD_Minimum*. Assim, *CaptureDistance* corresponde ao maior valor entre o mínimo definido e o valor percentual da profundidade.

$$CaptureDistance = MAX (CD_Minimum, Z \times CD_Scale) \quad (10)$$

No *scattering* a incerteza estimada de cada sonda, com base no modelo preditivo, é propagada tendo em consideração a distância da sonda ao nodo com base na Equação 11 (Calder e Wells, 2007), em que (σ_p) representa a incerteza vertical propagada; (σ_v) é a incerteza vertical da sonda; (σ_h) é a incerteza horizontal da sonda; (*dist*) é a distância da sonda ao nodo; (*hes*) é o escalonamento da incerteza horizontal; (*de*) é a potência de controlo do crescimento da incerteza vertical em função da distância da sonda ao nodo e (*node_spacing*) representa o espaçamento entre nodos:

$$\sigma_p^2 = \sigma_v^2 \left[1 + \left(\frac{dist + hes \times \sigma_h}{node_spacing} \right)^{de} \right] \quad (11)$$

A Figura 2.14 retrata os dois processos evidenciando ainda um outro factor, apenas as sondas com valor de incerteza propagada inferior ao admissível para a ordem do LH são compiladas. Realça-se que, uma mesma sonda pode contribuir para actualizar a estimação de mais do que um nodo.

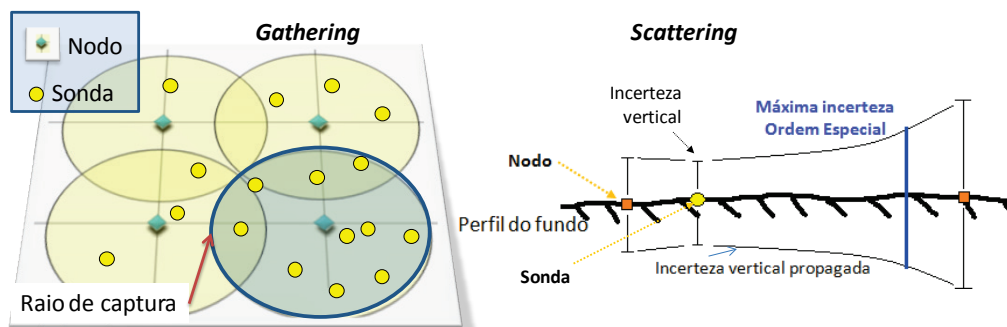


Figura 2.14 - Processos da função de assimilação

Antes da execução da função de intervenção é efectuada uma ordenação das sondas, tomando em consideração a sua consistência relativamente ao valor mediano de profundidade, com o objectivo de atrasar a entrada de valores anómalos e minimizar a probabilidade da inferência bayesiana efectuar um mau diagnóstico.

A função de intervenção consiste numa tarefa de análise sequencial em que é dada a capacidade de decisão ao CUBE de, na presença de uma sonda estatisticamente incompatível com a informação entretanto assimilada pelo nodo, criar uma hipótese de solução alternativa que será igualmente seguida no processamento sequente. Esta é a resposta do CUBE à possibilidade de, no fundo real, podermos obter diferentes profundidades para a mesma localização, o que constitui a verdadeira inovação do algoritmo relativamente a outras formas de modelação batimétrica (Calder e Wells, 2007). A Figura 2.15 ilustra a função de intervenção do CUBE. Com base na hipótese de solução nodal actual é efectuada a previsão da solução futura (hipótese estimada), com a qual é efectuada a

²⁸ Por defeito, este valor é de 5%.

comparação do valor seguinte de sonda assimilado no processo de *gathering*. Quando uma sonda é estatisticamente compatível com a hipótese prevista, o algoritmo procede à actualização do valor da hipótese, caso contrário, procede à criação de uma nova hipótese.

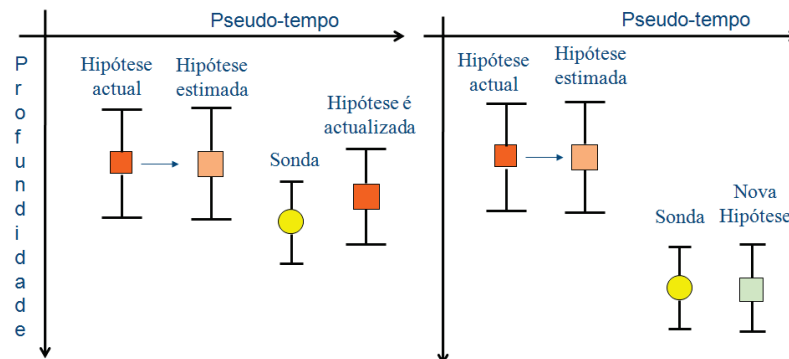


Figura 2.15 - A função de intervenção²⁹

No entanto, é necessário definir a partir de que valor se pode considerar uma sonda estatisticamente inconsistente com o conhecimento actual da profundidade nodal. Para tal, é necessário saber a diferença normalizada ($|e|_n$), entre a sonda em análise e a estimação actual da profundidade. Para a criação de uma hipótese alternativa é necessário que a sonda de entrada seja separada por um significativo degrau vertical, designado *Estimate Offset Value* (h). Este processo é controlado pelo factor de Bayes (B_n). Uma nova hipótese é formulada quando $\log B_n = 0$, pelo que, a Equação 12 deve ser satisfeita (Calder e Wells, 2007).

$$h^2 - 2h|e|_n = 0 \tag{12}$$

Assumindo uma distribuição normal das sondas e que todos os dados novos de entrada (sondas) devem estar de acordo com a profundidade estimada, e ainda que $|e|_n = 1,96$ para um nível de confiança de 95%, então (h) é dado pela Equação 13 (Calder e Wells, 2007).

$$h = 2|e|_n = 3,92; h > 0 \tag{13}$$

Um nodo pode ter uma ou mais hipóteses de solução. A função de desambiguação consiste numa classificação não supervisionada que decide qual das hipóteses de solução, determinadas pela função de intervenção, apresenta maior consistência. A função apresenta várias possibilidades de classificação ilustradas na Figura 2.16:

- Densidade: número de sondas assimiladas para a estimação da profundidade num determinado nodo
- Local: semelhança com os nodos vizinhos, ou seja, a hipótese com uma profundidade estimada mais próxima dos nodos adjacentes
- Densidade e local: consiste numa solução mista em que é seleccionada a hipótese com maior número de sondas assimiladas e, caso esta não apresente um valor de confiança³⁰ satisfatório, as outras hipóteses são avaliadas por comparação com os nodos vizinhos

²⁹ Adaptado de CARIS (2011).

³⁰ A noção de confiança na hipótese é apresentada no capítulo 2.5.2 quando se explicarem as camadas de informação associadas ao CUBE.

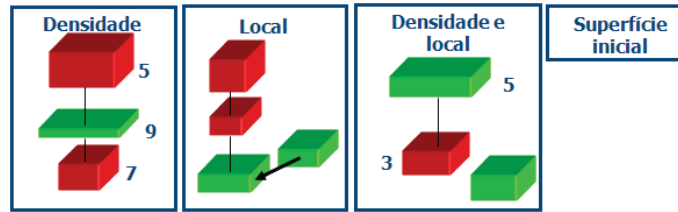


Figura 2.16 - A função de desambiguação³¹

2.5.2 Camadas de informação de saída

Como produtos, o CUBE gera estimações de profundidade nos nodos pré-definidos da superfície. Para cada nodo, são produzidos valores de profundidade³², de incerteza da profundidade³³, de número de hipóteses e de confiança nas hipóteses. Adicionalmente, a origem da grelha, espaçamento dos nodos (resolução) e a largura e o comprimento da grelha (em número de nodos) são guardados nos metadados, a partir dos quais, as coordenadas num referencial terrestre podem ser determinadas. Cada um destes conjuntos de valores é uma colecção de pontos estimados, podendo ser considerada, de forma clara, uma superfície. Assim, de modo a facilitar a manipulação, visualização e análise, os produtos referidos são gerados sob a forma de superfícies. A Figura 2.17 ilustra um perfil do fundo marinho a 2D com realce de sondas anómalas e, a superfície a 3D com evidência da classificação efectuada pelo CUBE. As sondas anómalas são hipóteses alternativas.

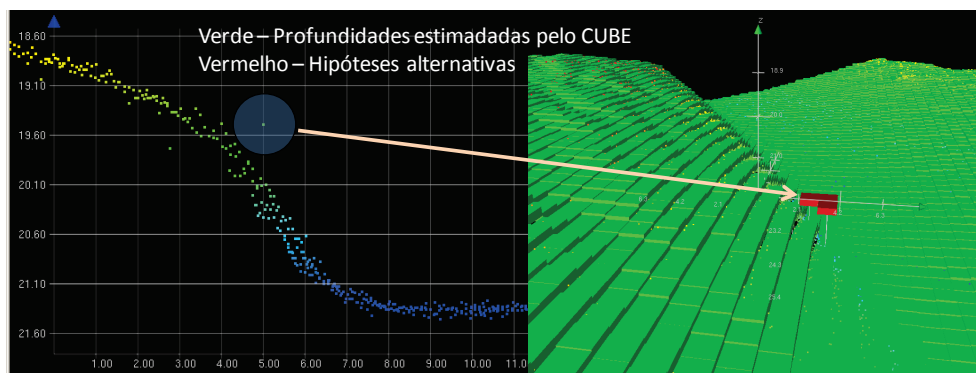


Figura 2.17 - Profundidades estimadas e hipóteses alternativas

A confiança das hipóteses (H_s), traduz a confiança que o CUBE tem na estimação de profundidade efectuada através do rácio expresso na Equação 14, em que (NS) é o número sondas que contribuíram para a formação da hipótese seleccionada na função de desambiguação e (NA) é o número de sondas existente em todas as hipóteses de solução nodal.

$$H_s = 5 - \frac{NS}{(NA - NS)} \quad (14)$$

Algumas implementações do algoritmo, tal como a efectuada pela CARIS (2011a), oferecem camadas de informação adicionais, designadamente, uma superfície de desvio padrão das sondas que

³¹ Adaptado de CARIS (2011).

³² A superfície batimétrica corresponde à representação da profundidade em cada nodo, após as hipóteses de solução terem sido desambiguadas.

³³ A superfície de incerteza corresponde à incerteza final associada a cada profundidade nodal.

contribuem para a estimação da profundidade nodal; uma superfície de desvio padrão nodal (representando o desvio padrão de todas as sondas que se encontram dentro do raio de captura de um nodo); superfícies de sondas mínimas, médias e máximas e, uma superfície de densidade que representa o número de sondas capturadas por nodo.

2.6 Resolução e especificações de uma superfície CUBE

Como referido na secção 2.1, a resolução de uma superfície batimétrica criada a partir de sondas adquiridas com sondadores acústicos depende da profundidade, das especificações técnicas dos sondadores utilizados (resolução espacial do sondador) e das metodologias/parametrizações utilizadas durante a aquisição e o processamento de dados. No entanto, não se pode esquecer o uso que se pretenda dar à própria superfície. Assim, por exemplo, se o objectivo do LH for a detecção de objectos cúbicos com 1 m de aresta (Ordem Especial), a resolução da superfície deve ser melhor que 1 m (NOAA, 2010b). Por outro lado, em estudos de dinâmica sedimentar, a superfície deve ter capacidade para representar adequadamente as estruturas dunares em estudo. Em trabalhos de controlo de operações de dragagem, a resolução deve ser tal que permita avaliar a qualidade das dragagens efectuadas. Torna-se claro que mediante o uso a dar a uma superfície, um LH terá de satisfazer, em termos de equipamentos utilizados e metodologias adoptadas, os requisitos de representatividade na superfície.

2.6.1 Resolução da superfície CUBE em função da densidade de dados

Rice e Calder (2009) efectuaram uma aproximação matemática à forma de definir a resolução espacial. Segundo estes autores, considerando a elevada e uniforme densidade de dados, própria dos SMF, e assumindo as premissas do CUBE, é suficiente uma quantidade de 3 a 5 sondas para estimar a profundidade nodal. Assim, com base nas características inerentes a um LH (sondador utilizado e profundidade) pode-se seleccionar a resolução mais adequada ao conjunto de dados de entrada.

De acordo com Artilheiro *et al.* (2010) a busca total do fundo tem por objectivo determinar as profundidades mínimas com relevância para a segurança da navegação, assegurando a detecção das estruturas cúbicas previstas na Tabela 2. O melhor indicador de detecção positiva é o número de sondas medidas sobre a estrutura, ou seja, a densidade de medições por unidade de área. Artilheiro *et al.* (2010) referem que a garantia da validação dessas estruturas, exige um número de medições suficiente, para que, durante o processamento e limpeza dos dados, essas medições sejam tomadas como representativas do fundo e devidamente validadas. Para preservar uma estrutura, é necessário que exista consistência e continuidade entre as medições efectuadas longitudinalmente, entre impulsos consecutivos, e transversalmente, entre feixes do mesmo impulso. De acordo com o *United States Corps of Engineers* (USACE, 2002) e o *Land Information New Zealand* (LINZ, 2010), considera-se que, para assegurar a detecção e validação de estruturas, devem ser efectuadas pelo menos 9 medições de profundidade sobre a face superior, potencialmente, 3 em cada eixo.

No entanto, a detecção positiva não garante a representação de uma estrutura numa superfície batimétrica. Considerando que são necessárias, no mínimo, 5 sondas para que o CUBE efectue uma estimação de profundidade estável, Rice e Calder (2009) afirmam a necessidade de, na presença de uma estrutura relevante sobre um nodo e, na necessidade de garantir a sua representação na superfície, serem necessárias, pelo menos, 13 sondas sobre a estrutura a representar dentro do raio de captura de sondas de um nodo. Este valor de 13 sondas, superior às 9 sondas que garantiam a detecção positiva referida pelo USACE e pelo LINZ, decorre do facto de numa estimação de profundidade nodal ter que se prever uma perda por ruído na modelação (Rice e Calder, 2009).

2.6.2 Especificações da NOAA

O *National Ocean Service* (NOS) é a entidade dentro da NOAA responsável pela observação, estudo e regulamentação das actividades relacionadas com os oceanos e zonas costeiras, incluindo as

actividades de cartografia e de navegação. Os documentos *Field Specifications* (NOAA, 2011a) e *Specifications and Deliverables* (NOAA, 2011b), nas suas versões do ano de 2010 (NOAA, 2010a; NOAA, 2010b), constituíram o primeiro passo efectivo para definir as superfícies batimétricas como o produto final dos LH. Assente nos requisitos mínimos de incerteza máxima admissível fixa pela S-44 (OHI, 2008), estes documentos definem os requisitos de resolução e detecção de objectos nas superfícies.

Na aproximação à superfície de navegação, referida no Capítulo 1, os dados de um LH devem ser arquivados sob a forma de um MNE construído a partir das sondas processadas. Raramente, a máxima resolução suportada pelos dados é necessária para futuros trabalhos (NOAA, 2010b). Torna-se então necessário estabelecer um compromisso entre a máxima resolução possível e a resolução requerida para as CN. No NOS, estas cartas são criadas a partir de generalizações apropriadas do MNE da superfície de navegação, requerendo esta, o conhecimento das incertezas associadas à informação batimétrica do modelo.

O NOS define que a resolução de um MB deve ser metade do tamanho do objecto mais pequeno que se pretenda detectar/representar. Assim, para LH de Ordem 1, que obriga à detecção de estruturas cúbicas de 2 m de aresta, a resolução da superfície deve ser superior a 1 m. Por outro lado, sempre que uma estrutura não seja correctamente representada no modelo, em termos de profundidade e tendo em consideração a segurança da navegação, o hidrógrafo deve designar uma sonda mínima (Figura 2.18) que prevalecerá à superfície, levando a que esta assuma para o nodo mais próximo o valor da sonda designada, dentro da área de representatividade do nodo.

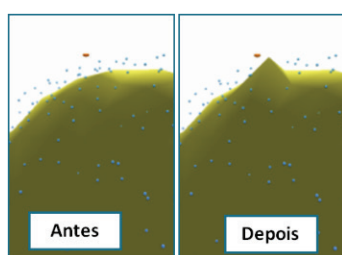


Figura 2.18 - Designação de sondas³⁴

O NOS elabora as especificações dos MB em função da cobertura batimétrica, podendo esta ser (1) Detecção de Objectos (MBDO), (2) Cobertura Completa (MBCC) e (3) Fiadas com espaçamento definido. As coberturas batimétricas para Detecção de Objectos e Completa obrigam à aquisição de dados com SMF e, estão directamente, correlacionadas com os requisitos mínimos dos LH exigidos pela OHI.

2.6.2.1 Critérios para a designação de sondas

O NOS definiu os seguintes critérios na designação de sondas críticas (NOAA, 2001b):

- Profundidades inferiores a 20 m: uma sonda deve ser designada quando a diferença entre a profundidade estimada para o nodo e a sonda mínima seja superior a metade do valor da incerteza vertical total permitida
- Profundidades superiores a 20 m: uma sonda deve ser designada quando a diferença entre a profundidade estimada para o nodo e a sonda mínima seja superior ao valor de incerteza vertical total permitida

³⁴ Adaptado de CARIS (2011a).

O hidrógrafo deve considerar ainda a escala do LH. Um bom exemplo é o caso de uma rocha existente no fundo do mar que se encontre no seguimento de um talude. Consoante a escala do LH, esta rocha poderá não ter qualquer relevância para a navegação. Assim, o NOS define que quando a distância entre duas sondas mínimas a designar for menor que 2 mm na escala de representação do LH (20 m para 1:10000) então, apenas a sonda mínima mais relevante deve ser designada.

Em zonas maioritariamente rochosas, com inúmeras estruturas, pode ser necessário designar inúmeras sondas, transformando o processamento semi-automático numa validação manual. Para contrariar esta necessidade, uma possível solução é incrementar a resolução da superfície, o que pressupõe uma aquisição de dados mais densa nas áreas de difícil solução.

Reciprocamente, valores anómalos ou identificáveis como “ruído” podem, igualmente, ser incluídos na superfície, desviando a estimação correcta da profundidade. Quando, esclarecedoramente, as sondas sejam identificadas como fonte de ruído na superfície e que, possuam uma diferença em relação à superfície superior à incerteza vertical total permitida, devem ser rejeitadas.

2.6.2.2 Cobertura batimétrica para detecção de objectos

Os MBDO devem seguir as seguintes especificações (NOAA, 2010b):

- A resolução dos MB é definida em função de intervalos de profundidade (Tabela 2.5)
- Até aos 20 m de profundidade, todos os objectos cúbicos de 1 m de aresta detectados na aquisição de dados devem estar representados na superfície. Para profundidades superiores a 20 m, utilizar o factor dimensional de 5% da profundidade
- Não podem existir nodos sem informação localizados sobre estruturas relevantes para a segurança da navegação
- Até aos 30 m de profundidade, não devem existir na superfície zonas com mais de 3 nodos adjacentes sem informação (*holidays*), sendo que 95% dos nodos da superfície devem estar povoados com pelo menos 5 sondas

Tabela 2.5 – Resolução dos MBDO

Intervalo de Profundidade (m)	Resolução da superfície (m)	Distância de Captura (m)
0 - 20	0,5	0,35
19 – 40 ³⁵	1	0,71

2.6.2.3 Cobertura batimétrica Completa

Os MBCC devem seguir as seguintes especificações (NOAA, 2010b):

- A resolução dos MB é definida em função de intervalos de profundidade (Tabela 2.6)
- Até aos 20 m de profundidade, todos os objectos com arestas de, pelo menos, 2 x 2 x 1 m detectados na aquisição de dados devem estar representados na superfície. Para profundidades superiores a 20 m, utilizar o factor dimensional de 10% da profundidade nas dimensões horizontais e de 5% da profundidade na dimensão vertical
- Não podem existir nodos sem informação localizados sobre estruturas relevantes para a segurança da navegação

³⁵ Em profundidades da ordem dos 20 m, onde existam taludes significativos, o intervalo de profundidade deve ser alterado para 17 – 40 m.

- Até aos 30 m de profundidade, não devem existir na superfície zonas com mais de 3 nodos adjacentes sem informação (*holidays*), sendo que 95% dos nodos da superfície devem estar povoados com pelo menos 5 sondas

Tabela 2.6 – Resolução das superfícies de Cobertura Batimétrica Completa

Intervalo de Profundidade (m)	Resolução da superfície (m)	Distância de Captura (m)
0 - 20	1	0,71
18 - 40	2	1,41
36 - 80	4	2,83
72 - 160	8	5,66
144 - 320	16	11,31
> 320	32	22,63

2.6.2.4 Parâmetros do CUBE estabelecidos pela NOAA

O NOS disponibiliza uma parametrização do CUBE (NOAA, 2010a) não autorizando o uso dos parâmetros disponibilizados por defeito por Calder e Wells (2007). Os parâmetros estipulados pelo NOS são:

- *Capture Distance Scale*: percentagem da profundidade utilizada para limitar o raio de influência de uma sonda. O valor por defeito é 5,0 %. O NOS define 0,5 o que, na prática, desactiva este parâmetro e força o raio de influência ao valor definido em *Capture Distance Minimum*.
- *Capture Distance Minimum*: é a distância mínima em que o CUBE efectua uma busca para identificar as sondas contribuintes para a estimação nodal. É utilizado em conjunto com o *Capture Distance Scale*. O valor por defeito é 0,5. Este parâmetro, na definição do NOS varia com a resolução da superfície, sendo dado pela equação 15.

$$Capture\ Distance\ Minimum = \frac{Resolução\ da\ Superfície}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

- *Horizontal Error Scalar (hes)*: é usado para escalar (propagar) a incerteza horizontal de cada sonda para os nodos. O valor por defeito é 2,95. O valor definido pelo NOS é 1,96 (95% de nível de confiança), uma vez que, a incerteza horizontal (2D) é colapsada na incerteza vertical (1D).

2.6.2.5 A incerteza final da superfície

A superfície final, resultante do processo de validação dos dados adquiridos deve, de acordo com as especificações do NOS, incluir as sondas designadas pelo hidrógrafo e apresentar, de forma conservadora para a segurança à navegação, como valor de incerteza vertical associado a cada nodo, o maior valor de:

- Incerteza estimada para o nodo (modelo preditivo)
- Desvio padrão das sondas contribuintes para o valor estimado de profundidade nodal, escalado a um nível de confiança de 95%

2.7 Algoritmos de modelação batimétrica

Com o incremento exponencial do volume de dados adquiridos pelos sistemas SMF, tornou-se mais moroso o processamento de dados na sua forma tradicional do que a aquisição dos mesmos. Assim,

a partir dos anos 90 foram sendo desenvolvidas metodologias e algoritmos de processamento assistido por computador, com o objectivo de facilitar a tarefa do hidrógrafo. Segundo Debese (2007) estes algoritmos efectuem a estimação de profundidade numa determinada localização, alguns avaliam ainda qualitativamente o processo de estimação utilizado e usam regras de decisão, quando possível, de modo a deduzir o estado de uma sonda ou a classificá-la.

Os primeiros algoritmos baseavam-se em metodologias cujo objectivo principal era a geração de uma superfície batimétrica que permitisse, de forma automática, o uso de filtros para a detecção e limpeza de valores anómalos e de erros grosseiros. A maioria destes algoritmos baseia-se na utilização de funções polinomiais ou de médias ponderadas. Seguidamente, o incremento da capacidade de computação permitiu o desenvolvimento de algoritmos cada vez mais robustos (Debese, 2007), baseados em estimadores-M (Debese *et al.*, 1998), técnicas de krigagem (Bottelier, 2004) ou filtros de Kalman (Calder e Mayer, 2003). Por se encontrar implementado no serviço hidrográfico francês e, igualmente, no SIS (Kongsberg, 2010) realça-se o algoritmo Tukey com estimadores-M (Debese *et al.*, 1999). No SIS, a implementação tem por objectivo a visualização da cobertura efectuada durante a aquisição de dados na forma descrita por Broen (2010).

Elmore *et al.* (2008) desenvolveram metodologias para a fusão de dados batimétricos de diversas origens e efectuaram um esclarecedor resumo do actual estado da arte. Actualmente, existem alguns algoritmos que permitem uma eficaz detecção de valores anómalos, como por exemplo, o *Intelligent Outlier Detection Algorithm* (IODA) aplicado na análise de séries temporais (Weekley *et al.*, 2010).

O problema dos algoritmos mencionados, excepto no caso do CUBE (Calder e Mayer, 2003), prende-se com a incapacidade de esses algoritmos efectuarem a estimação de profundidade e determinarem a incerteza associada, tal como é exigido pela OHI e pela NOAA.

Assente em axiomas bem fundamentados pela experiência dos hidrógrafos, o CUBE é um algoritmo que, para além da sua capacidade em efectuar a estimação de profundidade, baseada em critérios mensuráveis, ponderando o contributo de cada sonda mediante a análise das suas incertezas, possibilita o processamento de dados hidrográficos. É esta vertente do algoritmo, a sua capacidade de decisão, agrupando as sondas em distintas hipóteses de solução quando não são estatisticamente compatíveis, que torna o CUBE verdadeiramente inovador em relação a outros algoritmos. Os demais algoritmos estão orientados para a modelação de dados batimétricos mas, não têm autonomia nem capacidade para efectuar o processamento de dados e, decidir quais as sondas que, de facto, devem ser consideradas numa estimação, tendo por base o conhecimento da sua incerteza. O CUBE permite ainda a possibilidade única de, numa mesma posição, existirem profundidades diferentes, o que é um justo reconhecimento da realidade como ilustra a Figura 2.19.

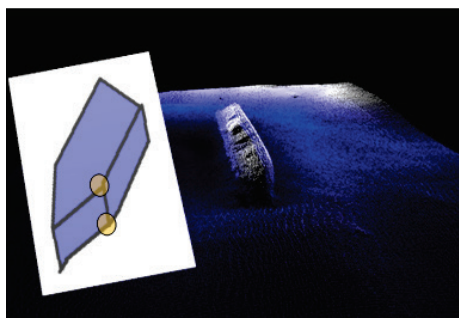


Figura 2.19 - Sondas distintas existentes numa mesma localização

O objectivo principal do CUBE é estimar a profundidade, em função das medições adjacentes e das respectivas incertezas e, simultaneamente, determinar a incerteza associada a essa estimação. Esta é uma das áreas em que o algoritmo pode e deve evoluir. Actualmente, as incertezas das sondas são

determinadas com base num modelo preditivo. É expectável e desejável, que no futuro, a esta modelação das incertezas se possa associar dados observados em fiadas de calibração do modelo, analisando estatisticamente a qualidade de um LH e, refinando os valores de incerteza preditivos. Esta é uma das grandes preocupações actuais, quando se sabe, por exemplo, a variabilidade espacial e temporal da VPS é algo que pode ser estudado e previsto mas que, na realidade dos LH, é desconhecida. Uma observação cuidadosa dos dados adquiridos permite concluir em que medida as variações da VPS na água afectam a incerteza das medições.

Actualmente, o CUBE é o único algoritmo de estimação da profundidade e incerteza utilizado pelos Serviços Hidrográficos, que utilizam o processamento semi-automático de dados adquiridos com SMF e, implementado na maioria das aplicações de aquisição e processamento de dados.

A CARIS, tem na sua aplicação de processamento de dados *Hydrographic Information Processing System* (HIPS) duas alternativas (*swath angle grid* e *uncertainty weighted grid*) para a modelação de dados batimétricos (CARIS, 2011a) mas, por se limitarem a efectuar médias ponderadas não devem ser utilizadas no processamento. A *swath angle* calcula, para cada nodo, uma média ponderada das sondas que distam menos de 5% da profundidade, dando um peso maior às sondas adquiridas com os feixes centrais. A *uncertainty weighted grid* efectua a ponderação tomando em consideração a incerteza das sondas, sendo esta determinada e propagada tal como descrita para o CUBE. O maior problema inerente a esta metodologia prende-se com o facto ilustrado na Figura 2.20. Uma vez que a determinação da incerteza das sondas é efectuada através do modelo preditivo, um valor anómalo pode ter uma incerteza menor que uma sonda válida e, conseqüentemente, ter um peso maior na estimação da profundidade. No CUBE, isto não acontece pois são geradas diferentes hipóteses de solução.

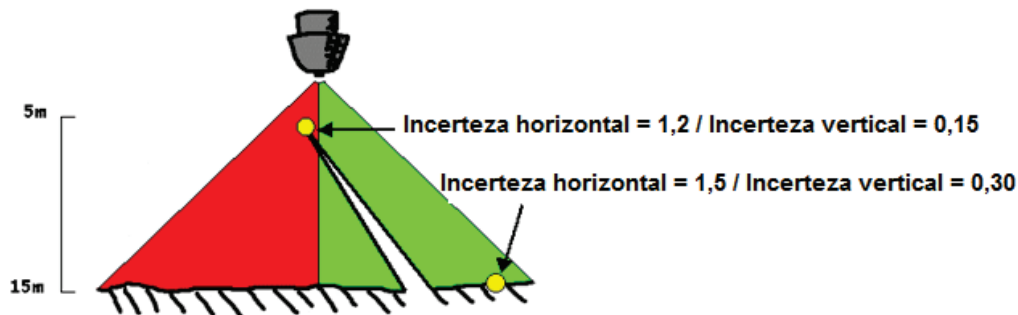


Figura 2.20 - Problemática da utilização de um modelo preditivo para estimação das incertezas³⁶

³⁶ Adaptado de CARIS (2011a).

3. Áreas de estudo, dados adquiridos e metodologia

O objectivo principal da dissertação é verificar se o processamento e a modelação de dados batimétricos com recurso ao CUBE garantem os requisitos de segurança da navegação.

No IH a construção de uma Carta Náutica (CN) segue as recomendações expressas em OHI (2010b). Relativamente à hidrografia, no IH desenvolveram-se procedimentos para construção das isóbatas baseados em MNE de malha TIN a partir do PBF do LH utilizado para controlo, e de dois ou três subconjuntos de sondas mínimas, dependendo da irregularidade do fundo, visando a construção de isóbatas com o grau de generalização adequado à escala da representação (Figura 3.1). As sondas a representar na CN são seleccionadas a partir do PBF do LH, cumprindo o critério da sonda mínima a partir de interpoladores baseados na variabilidade da profundidade da zona a representar.

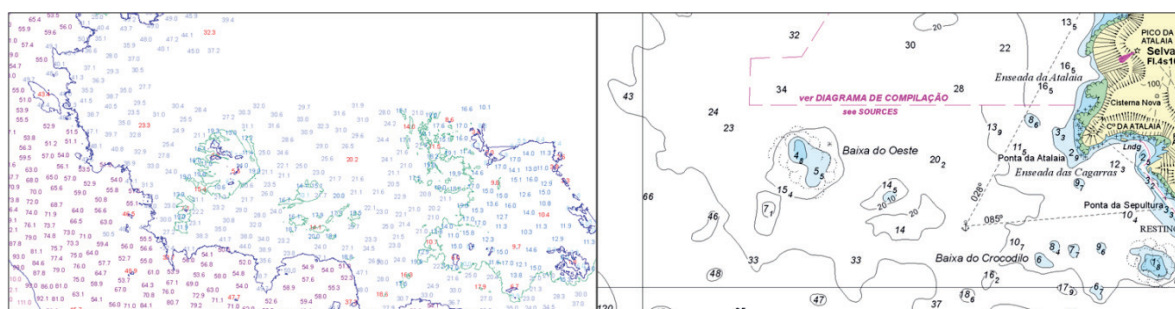


Figura 3.1 - Generalização da informação hidrográfica

Para alcançar o objectivo principal da dissertação efectuou-se, numa primeira fase o reprocessamento dos dados de LH anteriores e consequente comparação das superfícies batimétricas geradas com o PBF tradicional criado na época dos referidos levantamentos. Para alcançar uma análise mais abrangente foram seleccionados dois conjuntos distintos de dados:

- Passo da barra sul do Porto de Lisboa, área de baixas profundidades em que os fundos têm uma evolução e declive regular
- Área representada ao Plano A da CN 36407 (Plano da Selvagem Grande) de fundos muito irregulares, apresentando inúmeros afloramentos rochosos e uma grande variabilidade de profundidades

Nesta fase quantificou-se estatisticamente a diferença em profundidade entre as superfícies CUBE e a selecção de sondas mínimas validadas e, procurou-se perceber quais as situações em que o CUBE teve dificuldade em modelar correctamente e, quais as situações em que se pode confiar na estimação efectuada pelo algoritmo. Com base nos resultados desta fase Vicente *et al.* (2011) definiram um novo fluxograma de processamento de dados adquiridos com SMF, no qual, a modelação batimétrica assume um papel preponderante.

Na segunda fase pretendeu-se validar o fluxograma desenhado anteriormente, de modo a atingir os objectivos da dissertação, ou seja, a adequabilidade dos MB gerados pelo CUBE para a cartografia náutica. Para tal, foi efectuado um LH na barra do porto de Setúbal, sendo esta área sondada caracterizada por profundidades baixas com fundos de diferentes características. Os dados adquiridos foram processados de acordo com a nova metodologia proposta e, paralelamente, processados de acordo com processo tradicional, o qual foi realizado por um elemento da Divisão de Hidrografia do IH. O facto do processamento tradicional não ter sido efectuado pelo autor da dissertação foi importante por permitir a independência dos resultados obtidos pelos diferentes métodos de processamento.

No âmbito da avaliação do processamento de dados com recurso ao CUBE para o cálculo de volume dragado, que constitui o objectivo secundário da dissertação, foram utilizados os dados de LH executados no Canal do Alfeite em 2010, estando os resultados descritos em Vicente *et al.* (2011). No IH a informação de base ao cálculo de volumes é a resultante do PBF dos LH. Em regra, este tipo de LH é realizado de modo a cumprir os requisitos mínimos dos LH de Ordem Especial definidos pela OHI (2008). A partir da informação do PBF são construídos MNE para as situações hidrográficas inicial e final (pré e pós dragagem), construídos modelos de diferenças e calculado o volume da diferença.

O processamento de todos os dados foi efectuado recorrendo à implementação do CUBE na aplicação CARIS-HIPS versão 7.1 (CARIS, 2011a). Esta aplicação é utilizada no IH para o processamento de dados adquiridos com SMF.

3.1 Áreas de estudo e dados adquiridos

3.1.1 Fundos regulares: barra do porto de Lisboa

No passo da barra sul do Porto de Lisboa, os dados foram adquiridos em Abril de 2007, numa área definida por uma faixa de 675 m de largura por 5400 m de comprimento (Figura 3.2). O conjunto de dados seleccionado respeita a uma época em que o passo da barra se encontrava numa situação estacionária, ou seja, em que os fundos se podem definir como tendo uma evolução e declive regular. A zona sondada mais a nordeste, destacada na Figura 3.2, caracteriza-se pela existência de estruturas dunares de longo comprimento de onda, ou seja, com cerca de 80 a 100 m de comprimento e 4 a 5 m de altura. Sobre estas dunas, formam-se estruturas dunares de pequeno comprimento de onda, com cerca de 2 m de comprimento e cerca de 20 cm de altura.

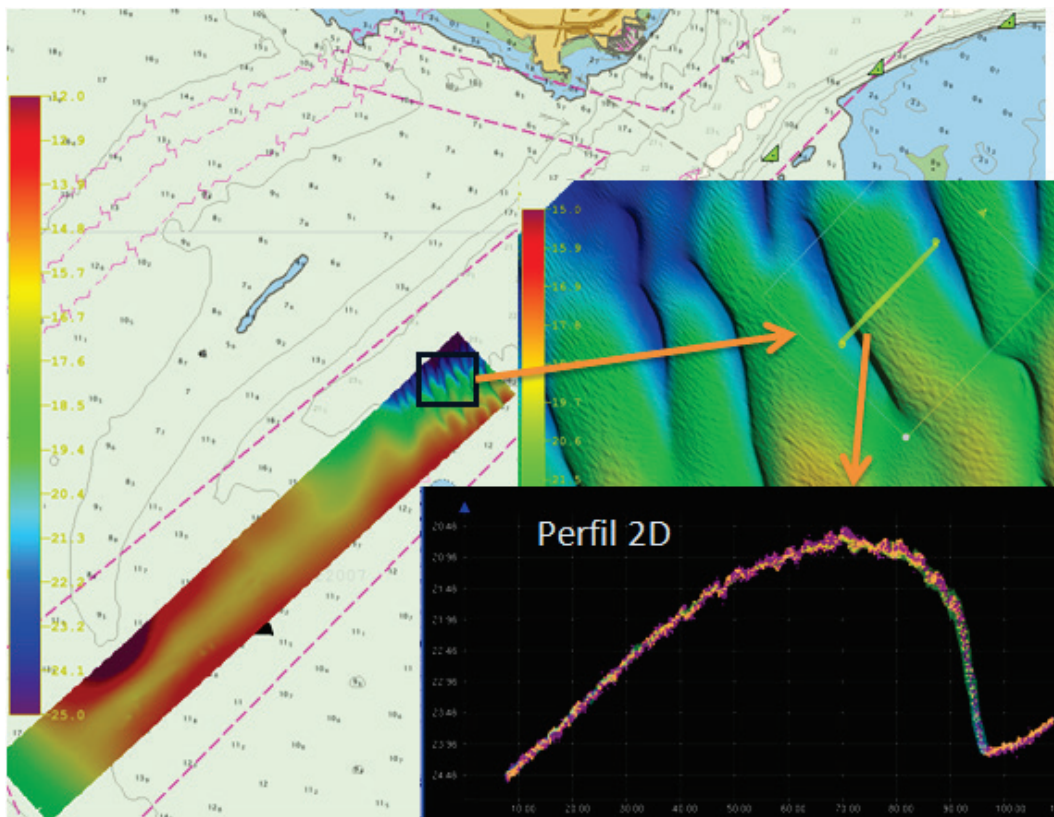


Figura 3.2 - Passo da barra sul do porto de Lisboa com realce das estruturas dunares

No LH de 2007, classificado em Ordem 1a, o sistema de aquisição de dados utilizado foi o SMF KONGSBERG EM3002 (Kongsberg, 2005) no modo equidistante de espaçamento de sondas, o que permitiu adquirir 160 sondas por cada feixe transmitido. Foram adquiridas cerca de 72 milhões de sondas das quais 95% foram consideradas válidas pelo hidrógrafo. Dos dados validados foram seleccionadas 897805 sondas, segundo o critério da sonda mínima em cada célula de 2 x 2 m, correspondendo a 1,3% dos dados validados, constituindo-se como o PBF do LH (Instituto Hidrográfico, 2007).

3.1.2 Fundos irregulares: Selvagem Grande

O LH da Selvagem Grande (Figura 3.3) ocorreu em Dezembro de 2009. A bordo do navio hidrográfico NRP³⁷ “ALM. Gago Coutinho” foram utilizados dois sistemas SMF. Em profundidades superiores a 300-400 m foi utilizado o SMF EM 120 (Kongsberg, 2004a) e, em profundidades inferiores, até à isóbata dos 50 m, foi utilizado o SMF EM 710 (Kongsberg, 2004b). Neste último foi utilizado o modo de espaçamento de sondas de elevada densidade (200 sondas adquiridas por cada feixe transmitido). Face às profundidades da área sondada e à cobertura efectuada pelo navio, os LH realizados foram classificados em Ordem 2. Nas áreas mais próximas de costa, nomeadamente, na área do fundeadouro e no acesso à doca da Selvagem Grande, foi utilizado o sistema SMF EM 3002 (Kongsberg, 2005) no modo equidistante de espaçamento de sondas, instalado numa embarcação de sondagem. Este sistema garantiu os requisitos da Ordem 1a excepto, em algumas zonas pontuais, onde não foi possível garantir a busca total do fundo (Instituto Hidrográfico, 2010).

A utilização desta área de estudo teve por objectivo avaliar o processamento com o CUBE num LH onde foram utilizados três sistemas SMF diferentes, de baixas, médias e grandes profundidades e, por os fundos possuírem uma grande variabilidade nas profundidades, fruto dos diversos afloramentos rochosos existentes no local.

Face à dimensão da área sondada foi limitado o estudo à área correspondente ao Plano A da CN 36407 (Selvagem Grande, representada no interior do rectângulo a roxo na Figura 3.3. Nesta zona foram adquiridas cerca de 170 milhões de sondas, das quais foram validadas e seleccionadas cerca de 10 milhões para PBF do LH, a partir das quais, foram definidos subconjuntos de dados para a construção do referido plano cartográfico.

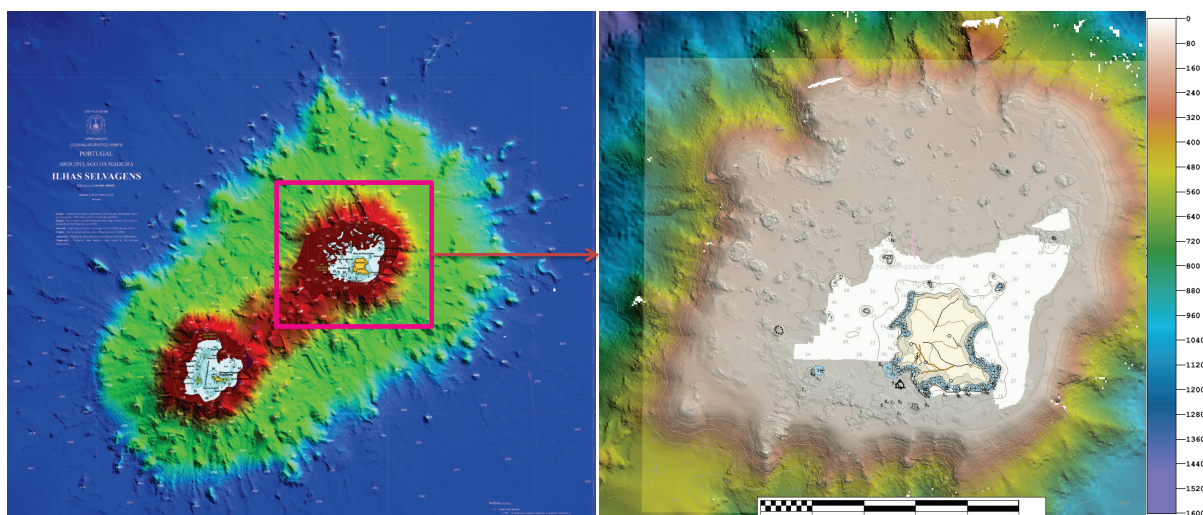


Figura 3.3 - Área sondada nas Selvagens com realce da CN 36407 – Plano A

³⁷ Navio da República Portuguesa

3.1.3 Fundos mistos: barra do porto de Setúbal

Os resultados do processamento dos dados das áreas anteriormente descritas foram obtidos antes do LH realizado em Setúbal, o que permitiu o planeamento do LH de modo a obter diferentes densidades de dados e avaliar, nestas circunstâncias, o processamento de dados.

O LH foi realizado com recurso ao sistema SMF Kongsberg EM 3002 instalado na UAM³⁸ “Atlanta”. Foram executadas 227 fiadas principais de sondagem, paralelas à orientação geral das isóbatas, e executadas 15 fiadas de verificação de sondagem, perpendiculares às fiadas principais. Antes do início do LH foram verificados e utilizados, durante a aquisição de dados, os seguintes parâmetros de calibração³⁹ do SMF:

- Desvio em cabeceio: 0,30°
- Desvio em relação à proa da embarcação: 1,90°
- Desvio em balanço: -0,32°

Na aquisição de dados foi utilizado o sistema de coordenadas geográficas ETRS89⁴⁰ com a instalação e operação de um sistema de posicionamento DGPS. Para a redução da sondagem adoptou-se como plano de referência o Zero Hidrográfico (ZH), situado 2,00 m abaixo do Nível Médio adoptado (NM) em Portugal continental.

A área do LH, ilustrada na Figura 3.4, foi subdividida em 3 subáreas, nas quais se usaram diferentes sobreposições entre faixas sondadas. A razão desta diferenciação, para além dos próprios objectivos de actualização cartográfica descritos em Instituto Hidrográfico (2011), teve por objectivo a realização de uma análise mais abrangente das capacidades e limitações do processamento com recurso ao CUBE perante diferentes densidades de dados.

A área designada por Barra corresponde à zona da barra da entrada do porto de Setúbal, tendo sido sondada com a especificação técnica de execução de um LH de Ordem 1a. Nesta área foi realizada uma cobertura com cerca de 50% de sobreposição entre faixas adjacentes. Na entrada da barra os fundos são caracterizados por uma rápida mudança da profundidade, dos 40 para os 12 m. Ao longo da barra as estruturas dunares são dominantes, algumas delas atingindo cerca de 4 m de altura.

A área denominada por Outao corresponde à zona compreendida entre o Outão e a entrada do canal norte do porto de Setúbal. Esta área é de profundidade muito variável, com grandes taludes na margem direita, entre o Albarquel e o Outão, em que os fundos variam rapidamente dos 5 para os 45 m. Por ser uma área mais profunda e que não oferece grandes preocupações à segurança da navegação, pretendeu-se a recolha de alguma informação que permitisse inferir sobre a estabilidade dos fundos sem obrigação de busca total do fundo (Ordem 1b).

A área designada por Comercial, correspondente à zona envolvente ao canal norte, foi sondada com a especificação técnica de execução de um LH de Ordem 1a, com uma sobreposição entre faixas sondadas de 20%, aproximadamente. Esta área é, predominantemente, regular em que os fundos variam entre os 5 e os 20 m.

Independentemente dos requisitos do LH, este foi conduzido de modo a satisfazer os critérios da Ordem Especial no que respeita à incerteza máxima admissível. Esta situação foi fundamental para aferir as potencialidades do CUBE nos LH de maior exigência. A Tabela 3.1 indica a informação adicional do LH efectuado.

³⁸ Unidade de Apoio à Marinha (UAM)

³⁹ A relevância e a metodologia de execução das provas de calibração são exploradas no Apêndice B.

⁴⁰ *European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89)*

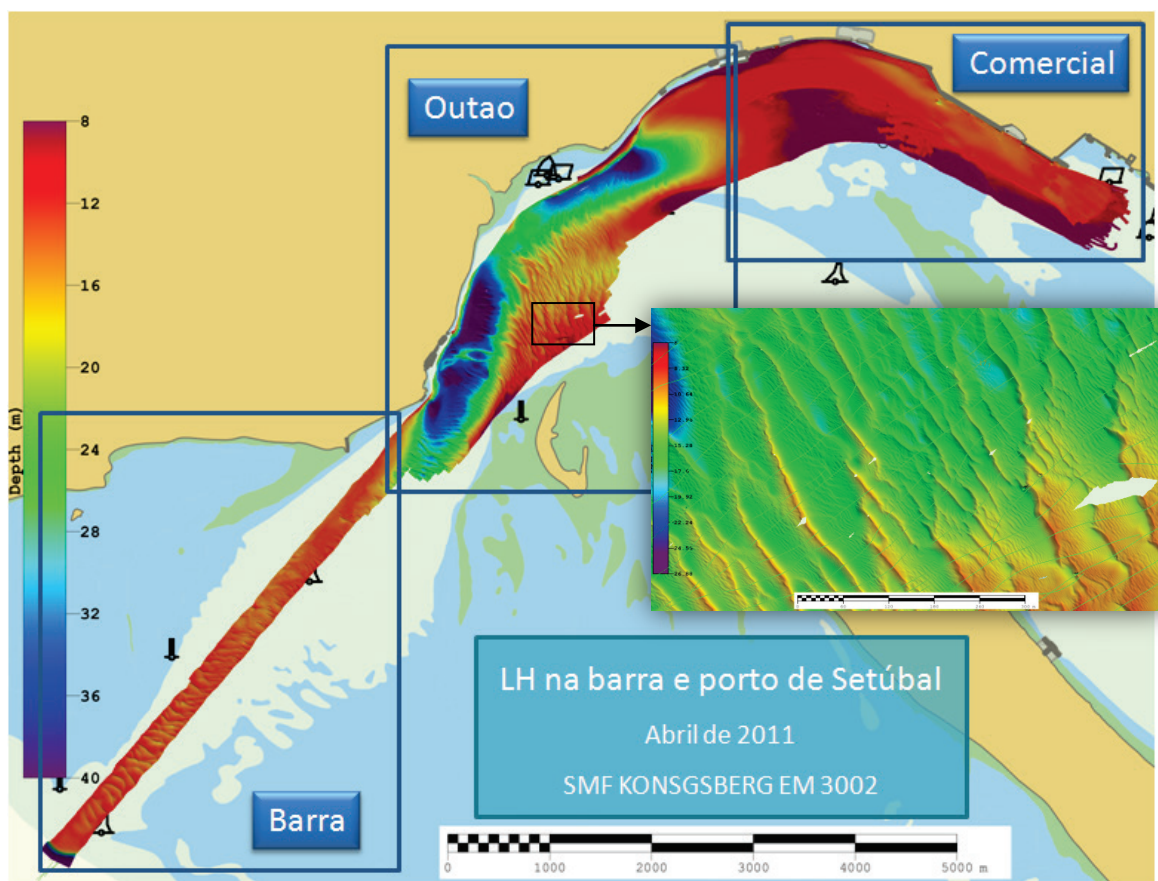


Figura 3.4 - Área do LH de Setúbal

Tabela 3.1 – Informação do LH (engloba o processamento tradicional).

Setúbal 2011	
Trabalhos de campo	2011-03-29 a 2011-04-05
Dias de trabalho no campo	9
Dias de sondagem efectiva	8
Dias de trabalho em gabinete (processamento tradicional)	18
Tempo efectivo de sondagem (HH:MM)	30:20
Tempo total de sondagem (HH:MM)	52:41
Tempo médio diário de sondagem (HH:MM)	06:35
Distância percorrida sobre perfis (km)	321
Área sondada (km ²)	12,04
Velocidade média de sondagem (m/s)	3,5
Intervalo de tempo entre posições de controlo (s)	0,2
Espaçamento médio no terreno entre posições de controlo (m)	0,7
Número de sondas adquiridas	391358596
Número de sondas validadas (processamento tradicional)	374287275
Número de sondas seleccionadas para o PBF tradicional	839685

Durante o LH, foi utilizado o algoritmo formação de feixes no modo de elevada densidade que permite formar 254 feixes por cada impulso transmitido. A Figura 3.5 compara o espaçamento entre sondas entre este modo (espaçamento médio de 1,2% da profundidade) e o modo equidistante (espaçamento médio de 2% da profundidade), num fundo regular com profundidade média de 20 m.

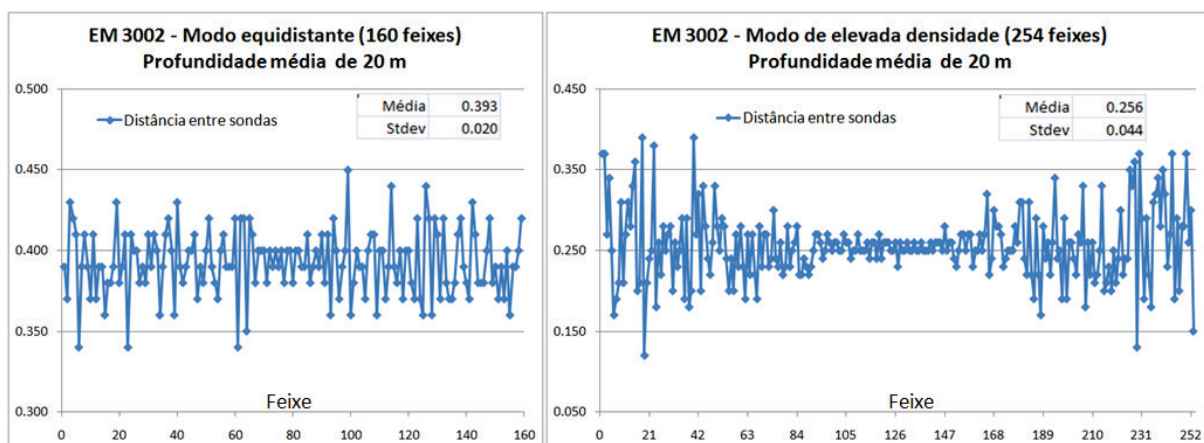


Figura 3.5 - Espaçamento transversal (m) entre sondas

Da análise dos gráficos da Figura 3.5 percebe-se que, para gerar um MB de 0,5 m de resolução em fundos de 20 m de profundidade é necessário o uso do modo de elevada densidade. Este modo, ao permitir um espaçamento médio entre sondas de cerca de 25 cm, seguindo as regras da NOAA (2011a), um MB de resolução de 0,5 m adquire, transversalmente, 2 a 3 sondas. Assumindo a profundidade de 20 m e uma velocidade de sondagem de 6 nós, longitudinalmente, ocorrem 2 a 3 impulsos dentro da área de captura. Fazendo uma análise idêntica para o modo equidistante, conclui-se que este não permite a geração de um MB de 0,5 m de resolução para a profundidade de 20 m, de acordo com o referido por Rice e Calder (2009).

3.1.4 Controlo de volumes dragados: canal do Alfeite

Para avaliar a utilização dos modelos batimétricos no cálculo do volume de dragados, foi escolhida uma zona de estudo no Canal do Alfeite, ilustrada na Figura 3.6, onde os LH são executados regularmente e onde existe informação sobre anteriores dragagens. No presente estudo, os LH pré e pós dragagem foram realizados sob as mesmas condições e com a mesma configuração de equipamentos, cumprindo os requisitos mínimos para LH de Ordem Especial. A zona de estudo apresenta uma área de 317490 m² com as profundidades compreendidas entre 4 m e 10 m.

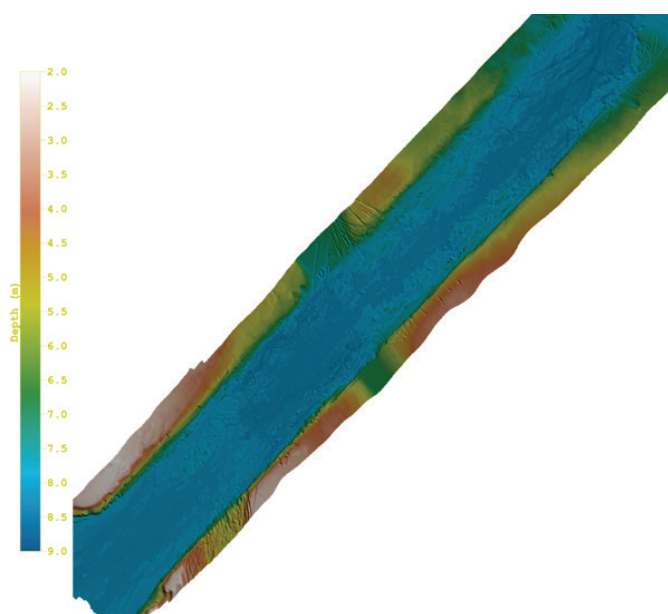


Figura 3.6 - Área de estudo do canal do Alfeite

A área foi sondada com recurso ao sistema SMF Kongsberg EM 3002 e utilizado o algoritmo formação de feixes no modo de elevada densidade. Para além desta configuração, a sobreposição entre faixas sondadas foi de 50 %, garantindo uma busca do fundo com uma cobertura de 200% e uma elevada densidade de sondas por nodo.

3.2 Fluxograma de processamento de dados

A criação de um novo fluxograma de processamento de dados (Figura 3.7), em substituição do fluxograma apresentado na Figura 2.11, assentou no conhecimento adquirido, no disposto em normas existentes (Instituto Hidrográfico, 2008b), nos procedimentos da NOAA (2010a) e no manual de utilizador do HIPS (CARIS, 2011a). A Figura 3.7 ilustra os 3 processos necessários para a validação e geração dos produtos finais de um LH.

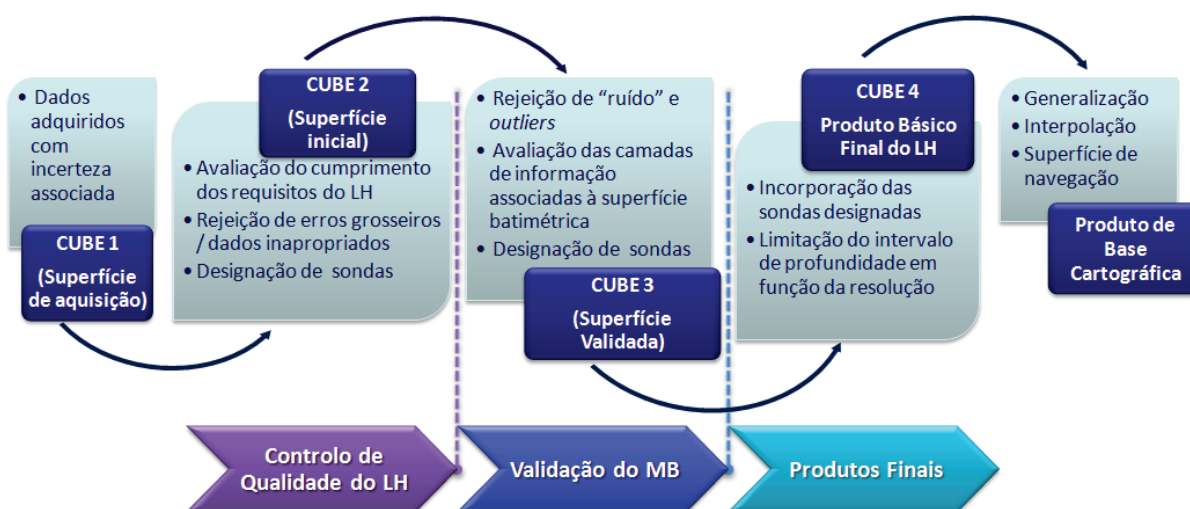


Figura 3.7 - Metodologia adoptada no processamento de dados

O primeiro processo designa-se Controlo de Qualidade do LH e termina com a geração da superfície CUBE 2 (superfície inicial). Realça-se que este processo deve ocorrer paralelamente à execução dos LH, para que seja possível adensar o LH de modo a colmatar situações anómalas e/ou duvidosas. Este processo é idêntico ao do processamento tradicional porque o facto de ser realizado durante a execução do LH constitui a garantia de que, independentemente dos resultados do LH, os requisitos do mesmo foram cumpridos. As tarefas base do Controlo de Qualidade do LH são as seguintes:

- Preparação e análise dos diferentes datagramas (navegação, atitude, sondas observadas, marés observadas, variação de calados/linha de água)
- Georreferenciação das sondas, aplicação de correcções e redução de maré
- Cálculo das incertezas horizontais e verticais e rejeição das sondas com incerteza superior à admissível para a ordem do LH
- Geração da superfície CUBE 1 para detecção e inspecção de situações anómalas (falhas de cobertura, erros grosseiros e sistemáticos, etc.)
- Rejeição de erros grosseiros e correcção, se possível, de erros sistemáticos
- Identificação de objectos e/ou estruturas relevantes para a navegação com designação de sondas
- Análise da cobertura efectiva da área sondada

- Comparação das fiadas de verificação com as superfícies CUBE 1
- Geração da superfície CUBE 2 (superfície inicial de processamento), para a qual concorrem as fiadas principais de sondagem e as fiadas de verificação
- Cálculo da informação estatística dos MB CUBE 2 através da aplicação BASE QCREPORT⁴¹ (CARIS, 2011a) integrada no HIPS

O segundo processo designa-se Validação do MB. De uma forma simples, neste processo efectua-se uma análise cuidada de todas as camadas de informação da superfície CUBE 2. Para obter uma superfície estatisticamente mais consistente podem ser aplicados filtros automáticos para rejeição de valores anómalos. Este processo termina com a geração da superfície validada (CUBE 3). A Validação do MB constitui a verdadeira inovação efectuada pela utilização do CUBE no processamento dos dados de modo a servir os propósitos da cartografia náutica. Nesta fase são utilizadas técnicas de análise, processamento manual e/ou automático e de visualização dos dados adquiridos e das profundidades estimadas pelo CUBE.

Por fim, nos Produtos Finais, o último processo, é criado o PBF do LH. Dependendo da profundidade e do objectivo do LH, uma ou mais superfícies podem ser geradas (CUBE 4). Estas devem incluir as sondas designadas e a opção de refazer a superfície de incerteza com base nos critérios definidos na secção 2.6.2.5, ou seja, considerar para cada nodo o maior valor de entre a incerteza proveniente da incerteza estimada, baseada no modelo preditivo, ou do desvio padrão das sondas contribuintes para o valor estimado de profundidade nodal, propagado a um nível de confiança de 95%.

A grande diferença entre a modelação batimétrica para a cartografia náutica e para outros fins consiste na necessidade de limitar a estimação da profundidade de um nodo à utilização de sondas que se localizem no raio de influência desse mesmo nodo. Deste modo se justificam as especificações dos MB exigidos pela NOAA. Na modelação dos dados adquiridos foram utilizados os seguintes parâmetros do CUBE, todos eles constantes nas especificações da NOAA (2010b):

- *Estimate Offset*: limite em distância à estimação actual, a partir do qual, são geradas novas hipóteses de profundidade. O valor pode variar entre 0,1 e 10, sendo utilizado o valor de 4,0
- *Capture Distance Scale*: Percentagem da profundidade que limita a distância máxima de captura de sondas para a estimação da profundidade nodal⁴². A NOAA fixou este valor em 0,5%, o que na prática inutiliza o uso deste valor, uma vez que, este é utilizado em conjunto com o *Capture Distance Minimum*. A NOAA definiu este último valor em função da resolução do MB. Assim, no LH de Setúbal foram criados MB de 0,5 m, de 1 m e de 2m de resolução, pelo que, foram utilizados os valores de 0,35 m, de 0,72 m e de 1,41 m, respectivamente
- *Horizontal Error Scalar*: Valor entre 0 e 10 utilizado para ponderar a incerteza horizontal (2D) das sondas na propagação da incerteza vertical (1D). A NOAA adoptou o valor de 1,96
- *Density Strength Limit*: Valor utilizado para mudar do modo de desambiguação DENSIDADE para o modo LOCAL, quando da utilização do modo de desambiguação DENSIDADE e LOCAL. Foi utilizado o valor de 2 que indica que quando a confiança na hipótese for inferior a 2, ou seja, entre 2 e 5, é dada primazia ao modo de desambiguação LOCAL

⁴¹ Esta aplicação permite saber a percentagem de nodos cuja incerteza e/ou desvio padrão possuem valores acima da máxima incerteza admissível para a Ordem do LH, de acordo com os critérios da OHI. Permite ainda saber quais os nodos que não possuem informação (nulos).

⁴² A resolução espacial dos SMF (cerca de 2% da profundidade) decresce com o aumento da profundidade, pelo que, por defeito, o valor adoptado é igual a 5% da profundidade. Num LH com uma densidade de sondas homogénea, este valor garante a captura de 5 a 9 sondas na estimação nodal. Este valor pode ser inferior em LH com maior densidade e resolução espacial dos dados ou, na presença de mudanças abruptas na profundidade, tal como analisado por Vasquez (2007) na optimização deste parâmetro para as águas da Patagónia.

- *Locale Strength Maximum*: Selecção dos nodos vizinhos, no modo de desambiguação LOCAL, que contribuem para a determinação de um valor médio para comparação com as hipóteses de um nodo a desambiguar. Foi utilizado o valor de 2,5 que indica que apenas os nodos vizinhos com uma confiança na hipótese entre 0 e 2,5 são utilizados
- *Locale Search Radius*: Raio de busca, em número de nodos vizinhos, utilizado no parâmetro *Locale Strength Maximum*. Foi utilizado o valor de 1

3.3 Processamento de dados

Seguindo a metodologia da Figura 3.7, os dados adquiridos na barra de Lisboa, Selvagem Grande e canal do Alfeite foram reprocessados. Na Barra de Lisboa foram utilizadas resoluções de 0,5 m, de 1 m e de 2 m para as superfícies de modo a avaliar o comportamento de diferentes resoluções na mesma área. Na Selvagem Grande, seguindo critérios idênticos aos definidos pela NOAA (2010b), foram construídas 7 superfícies finais, cada uma das quais referida a um intervalo de profundidade, garantindo uma densidade de sondas por nodo, aproximadamente, homogénea.

No canal do Alfeite e para avaliar a utilização dos MB no cálculo do volume de dragados, foram construídos MNE de diversas resoluções (0,5 m - 1 m - 2 m e 3 m) para as situações hidrográficas inicial e final (pré e pós dragagem), construídos modelos de diferenças e calculado o volume da diferença. No cálculo com recurso aos MB provenientes do CUBE foram ainda consideradas modelos de diferenças da superfície inicial e da superfície validada (CUBE 2 e CUBE 3 do fluxograma apresentado na Figura 3.7).

Para não tornar exaustiva a descrição do processamento de dados, apenas se apresentam nas secções seguintes os passos essenciais dos processos de Validação dos MB e de elaboração dos Produtos Finais, relativas ao LH realizado em Setúbal. Por o processo de Controlo de Qualidade do LH ser idêntico ao do processamento tradicional, uma descrição mais detalhada é remetida para o Apêndice C.

3.3.1 Modelos batimétricos gerados no processamento do LH de Setúbal

De modo a permitir uma análise mais abrangente, no processamento dos dados do LH de Setúbal foram criadas as seguintes superfícies de diferenças:

- *Shoal_diff*: resulta da subtracção das camadas de informação pré-existentes *Depth* e *Shoal*. Representa a diferença em profundidade num nodo entre a profundidade estimada num nodo e a sonda mínima capturada. Pode ser determinada utilizando as camadas de informação da CUBE 3 ou da CUBE 4
- *Depth_FinalUnc*: resulta da subtracção das camadas de informação *Depth* da CUBE 3 e *Uncertainty* da CUBE 4⁴³. É uma forma conservativa de dar segurança aos valores de profundidade

Tendo em consideração as especificações da NOAA (2010b), foram elaborados MBDO e MBCC de modo a avaliar quais se adequam melhor aos requisitos da cartografia náutica. Assim, foram elaborados os modelos descritos na Tabela 3.2. Na designação dos MB utilizou-se a nomenclatura X-Cobertura-Área-Resolução, em que:

- X designa a fase do processamento de dados, ou seja, o valor 1 (para CUBE1) e assim sucessivamente até ao valor 4 (para CUBE4) de acordo com a Figura 3.7 ou, a letra C, quando se refere à camada de informação *Depth_FinalUnc*, anteriormente referida

⁴³ A selecção da *Depth* da CUBE 3 deve-se ao facto de esta não ter ainda assimilado as sondas designadas e a selecção da *Uncertainty* da CUBE 4 justifica-se por esta camada de informação conter o contributo do desvio padrão.

- Cobertura assume as siglas DO ou CC, consoante se trate de um MBDO ou de um MBCC, respectivamente
- Área corresponde à designação referida na Figura 3.3 e na Tabela 3.2, ou seja, Barra, Outao ou Comercial
- Resolução corresponde à resolução do modelo, ou seja, 0,5 m, 1 m ou 2 m, sendo escrita da forma 0_5m, 1m ou 2m, respectivamente

Tabela 3.2 – MB elaborados e resoluções utilizadas

Área	Modelos Batimétricos	Resolução (m)	Capture_Distance (m)
Barra	Barra-0_5m	0,5	0,35
	Barra-1m	1	0,71
	Barra-2m	2	1,41
Outao	Outao-0_5m	0,5	0,35
	Outao -1m	1	0,71
	Outao -2m	2	1,41
Comercial	Comercial-0_5m	0,5	0,35
	Comercial -1m	1	0,71

A ferramenta do HIPS BASE QCReport (CARIS, 2011a) permite obter informação estatística sobre a modelação batimétrica efectuada, nomeadamente, o número de nodos sem informação e a percentagem de nodos que possuem uma incerteza menor que a máxima incerteza vertical requerida pela Ordem do LH. Foram seleccionados e aplicados os seguintes parâmetros do BASE QCReport:

- Critérios para a definição de *holidays*⁴⁴:
 - Raio de busca = 1
 - N° mínimo de nodos populados, dentro do raio de busca = 6
- Valores de incerteza utilizados: maior valor entre a incerteza ou o desvio padrão a 95% de nível de confiança

3.3.2 Validação dos Modelos Batimétricos (Setúbal)

No processamento tradicional todos os dados são analisados com recurso às ferramentas de visualização 2D e 3D do HIPS. A área sondada é dividida em vários subconjuntos de sondas (*subset*), sobre os quais, uma faixa (*slice* 2D) vai correndo e, simultaneamente, permitindo a visualização das sondas. Cada *subset* analisado é marcado por um sistema de cores comparáveis a “azulejos” (*tiles*) que garantem ao hidrógrafo um mapa de situação da área processada (Figura 3.8).

Na janela de visualização 2D da Figura 3.8, para além das faixas sondadas em cada fiada sobre o *slice* assinalado, pode-se observar a informação relativa às profundidades estimadas pelo CUBE, ilustradas pelos quadrados a verde. Rapidamente se entende que, em regra, o MB é uma superfície determinada com base numa média ponderada de um conjunto de sondas que possuem uma certa conformidade e que não se afastam do MB mais do que um determinado valor, baseado na incerteza das medições.

⁴⁴ Um *holiday* é, de acordo a parametrização definida, um nodo sem informação que tenha 2 dos 8 nodos adjacentes também sem informação. Estes parâmetros não correspondem exactamente ao critério definido pela NOAA (secções 2.6.2.2. e 2.6.2.3.), no entanto, actualmente, é o possível de aplicar, tomando em consideração as opções disponibilizadas pela CARIS (2011a).

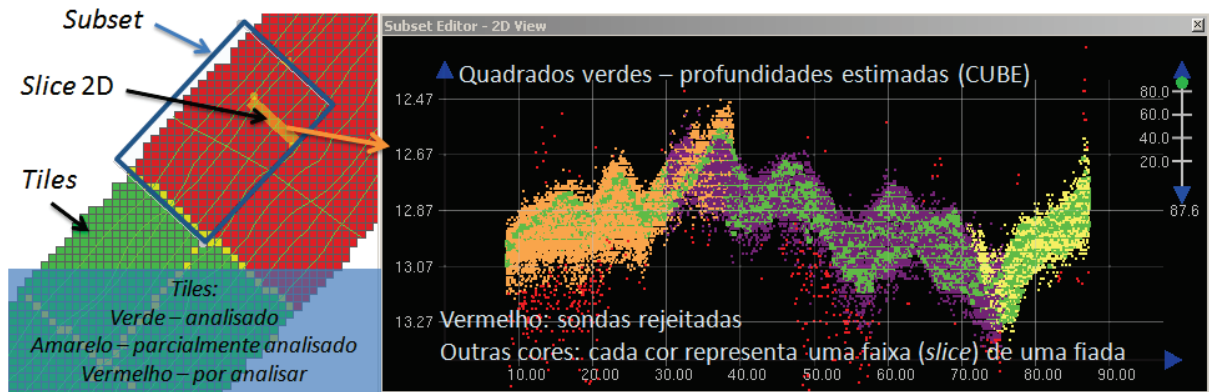


Figura 3.8 - Aspectos da visualização e validação de dados

3.3.2.1 Limpeza automática

O hidrógrafo pode socorrer-se de MB que o auxiliam a rejeitar, de forma automática, sondas anómalas e/ou ruído. Sem a ajuda desses MB, e recorrendo unicamente às sondas visualizadas em cada *slice*, torna-se difícil o julgamento sobre se uma sonda é parte do relevo ou ruído. A Figura 3.9 ilustra esta situação. O grupo de sondas assinalado na imagem da esquerda, aparentemente, parece um conjunto de sondas dispersas e que tendem a ser potencial ruído. No entanto, se avançarmos com o *slice*, na imagem da direita, observamos que aquele grupo de sondas faz parte da estrutura representada. Por outro lado, em termos de segurança da navegação, as sondas assinaladas na imagem da esquerda (mínima de 11,8 m) tornam-se irrelevantes quando avançamos para a imagem da direita (mínima de 11,6 m), considerando a largura do *slice* de 5 m.

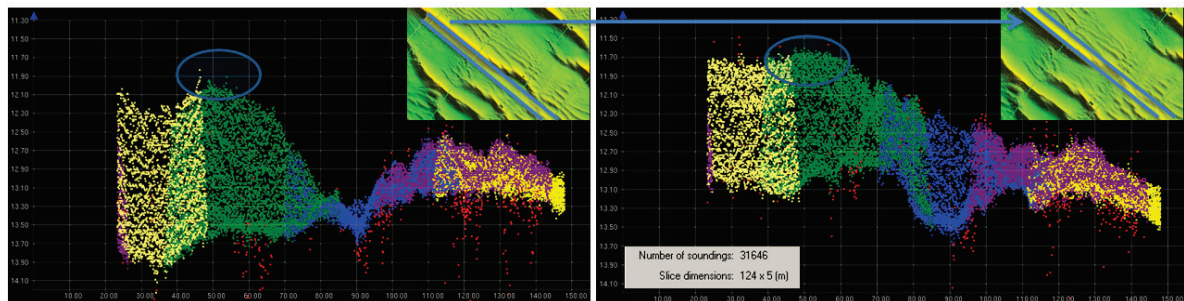


Figura 3.9 - Condicionantes da visualização 2D

A Figura 3.9 ilustra ainda diversas sondas, de cor vermelha, rejeitadas automaticamente pelo filtro de limpeza. Este, explicado na Figura 2.12 na secção 2.4, rejeita as sondas que se afastem mais do um determinado valor, definido a partir da incerteza e/ou do desvio padrão. Repare-se na Figura 3.10, num *slice* de 5 m de largura, em que foram obtidas cerca de 50 mil sondas, o que é que pode ser definido como ruído ou como valores anómalos? Aparentemente, as sondas dispersas são valores anómalos, no entanto, esta conclusão só pode ser retirada após a visualização dos *slices* anterior e posterior de modo a avaliar correctamente a variabilidade do fundo marinho. Por outro lado, no interior da zona de acumulação de sondas podem existir valores anómalos não discrimináveis. Assim, face à densidade de sondas existente, apenas uma análise estatística com recurso à modelação batimétrica permite a identificação global de valores anómalos. Utilizando um MB de resolução 1 m, a Figura 3.11 exemplifica as situações descritas. Na imagem da esquerda observa-se que a maioria das sondas dispersas é englobada como hipóteses alternativas pelo CUBE (quadrados a vermelho). Repare-se que existem sondas sobre a zona de acumulação que são marcadas como soluções alternativas, ou seja, são potenciais valores anómalos não possíveis de discriminar por esta

visualização. A Figura 3.11, na imagem da direita, ilustra ainda a aplicação de um filtro baseado na rejeição de todas as sondas que se afastem mais do que o maior valor entre a incerteza estimada no nodo ou o desvio padrão, a um nível de confiança de 95%.

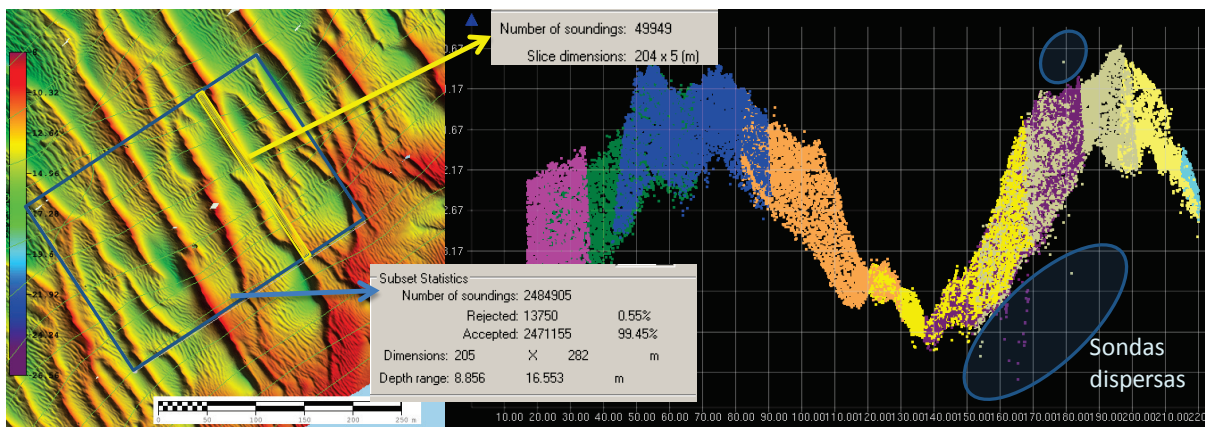


Figura 3.10 - Visualização de dados (subset na área Outao)

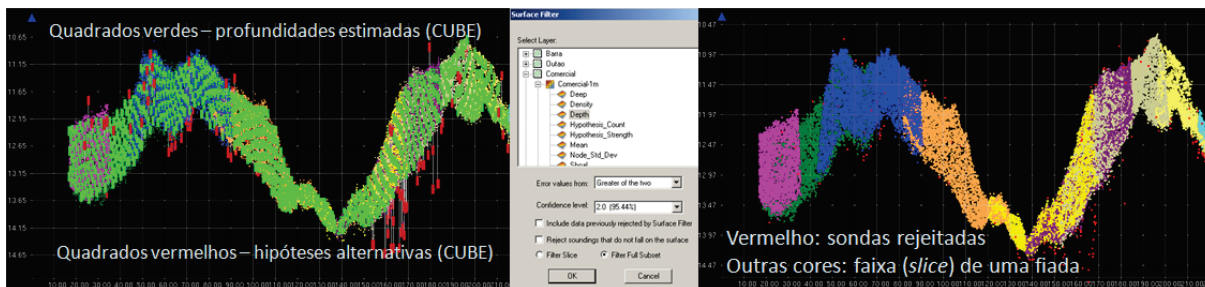


Figura 3.11 - Limpeza automática

No processamento proposto na presente dissertação, as profundidades estimadas pelo CUBE passam a ser a informação final do LH. Neste sentido é levantada a questão: qual o resultado prático de utilizar o filtro automático para rejeitar ruído que, normalmente, acaba por ser assimilado pela estimação de profundidade, ou valores anómalos que, normalmente, acabam por ser acomodados em hipóteses alternativas? A resposta prende-se com a necessidade de obter MB estatisticamente mais consistentes e sobre os quais se possam efectuar comparações de informação, nomeadamente, no que respeita aos critérios de designação de sondas estabelecidos pela NOAA (secção 2.6.2.1).

Outra questão surge de seguida, qual o MB a utilizar para efeitos de limpeza automática? Observe-se as Figuras 3.12 e 3.13, onde está ilustrado um conjunto de sondas anómalas que passaram na fase de controlo de qualidade. Estas sondas têm origem numa perda no seguimento do fundo por parte do SMF. A Figura 3.12 ilustra as estimações de profundidade (quadrados a verde) de um MB com 0,5 m de resolução que, por falta de sobreposição com fiadas adjacentes, acaba por efectuar estimações inadequadas na zona assinalada onde está representado um conjunto de sondas anómalas. Quando se aplica o filtro, a rejeição de sondas, a vermelho, acaba por não ser eficaz, uma vez que as sondas em torno das estimações inadequadas não são rejeitadas.

Na Figura 3.13 observa-se a aplicação do mesmo filtro utilizando um MB de 1 m de resolução. Desta feita, todas as sondas anómalas acabam por ser rejeitadas automaticamente.

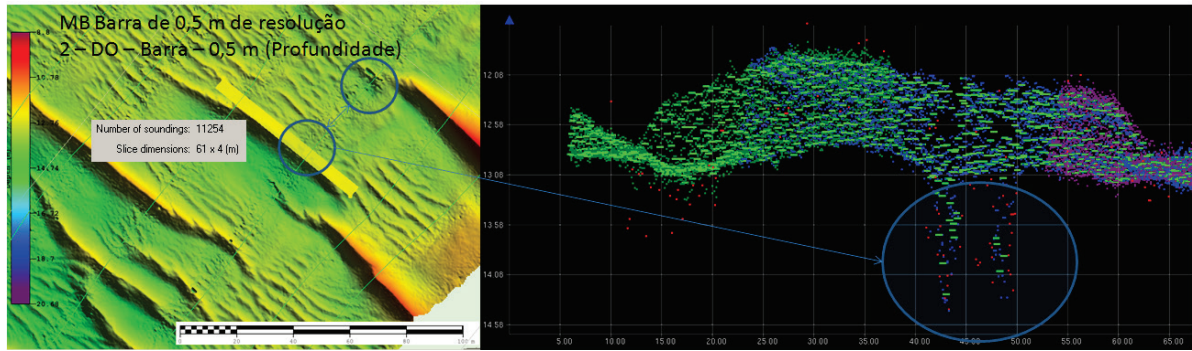


Figura 3.12 - Limpeza automática com recurso a um MB de 0,5 m de resolução

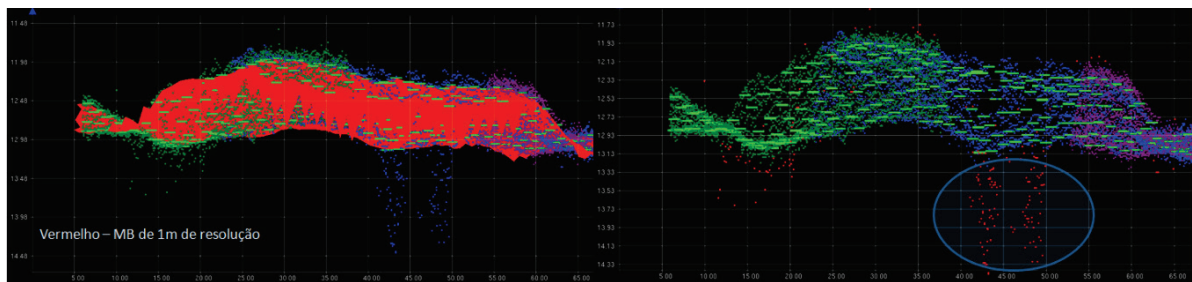


Figura 3.13 - Limpeza automática com recurso a um MB de 1 m de resolução

Por outro lado, em zonas onde existem grandes variações de profundidade, tal como ilustrado na Figura 3.14, pode ser necessário utilizar um MB de maior resolução na limpeza automática. Nestes casos, o uso de baixas resoluções pode implicar rejeições erradas de diversos conjuntos de sondas, assinalados na da imagem da esquerda, onde foi utilizado um MB de resolução de 2 m. Na imagem da direita foi utilizado um MB de 1 m com evidentes melhorias no nível de rejeição.

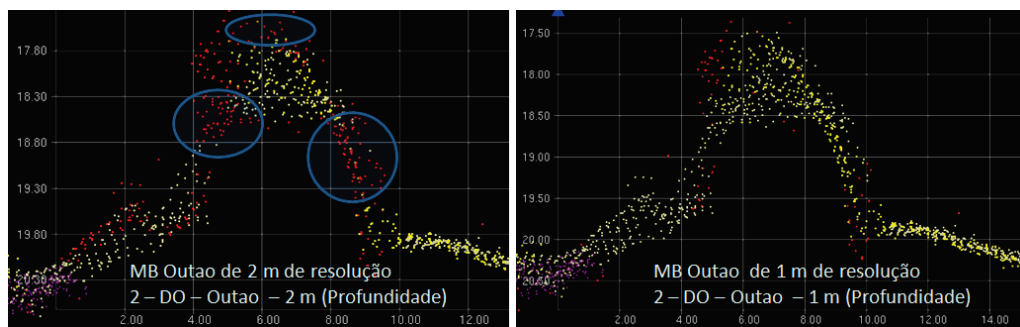


Figura 3.14 - Selecção do MB para a limpeza automática

3.3.2.2 Densidade de sondas por nodo

Apenas se apresenta a densidade de sondas nas áreas da Barra e Comercial, uma vez que, na área do Outao não era requerida a busca total do fundo. A Figura 3.15 ilustra a densidade de sondas do MB de 0,5 m de resolução da área da Barra com realce para a existência pontual de nodos sem informação, a baixa densidade de sondas nas zonas sem sobreposição de faixas sondadas e algumas situações de perda de fundo, devidas a falhas na transmissão e/ou na recepção de sinal ou à eliminação de erros grosseiros. O objectivo inicial de 50% sobreposição entre faixas sondadas não foi atingido devido ao difícil governo da embarcação, como é visível no traçado das fiadas (linhas a verde). Realça-se ainda a importância do uso das fiadas de verificação como forma de adensar a

sondagem. Na imagem da direita o limite máximo indicado de 16 não corresponde à realidade, sendo introduzido para adaptar a escala de visualização de cores aos valores que se pretendem destacar (5 e 13). A Figura 3.16 ilustra a densidade de sondas do MB de 1 m de resolução da área da Barra com realce da baixa densidade de sondas registada nas zonas de fronteira e das zonas sem sobreposição entre faixas sondadas. A Figura 3.17 ilustra as profundidades do MB de 0,5 m de resolução da área Comercial. A Figura 3.18 ilustra a densidade de sondas do mesmo MB com realce da baixa densidade de sondas que ocorre apenas em situações pontuais.

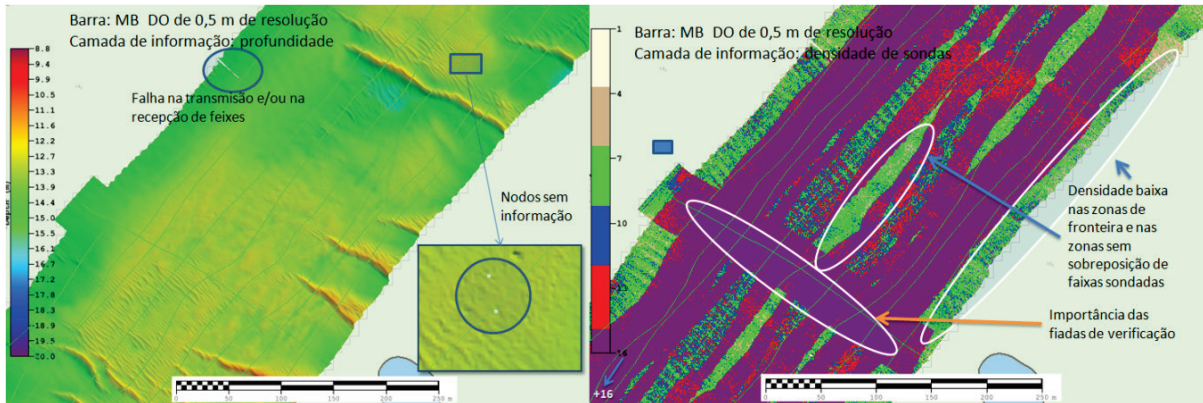


Figura 3.15 - MB 2-DO-Barra-0_5m (parcial)

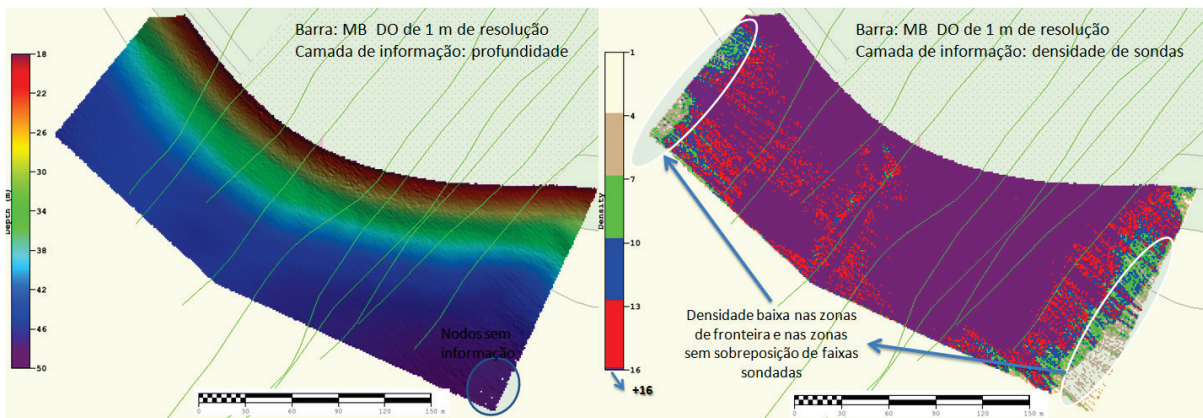


Figura 3.16 - MB 2-DO-Barra-1m

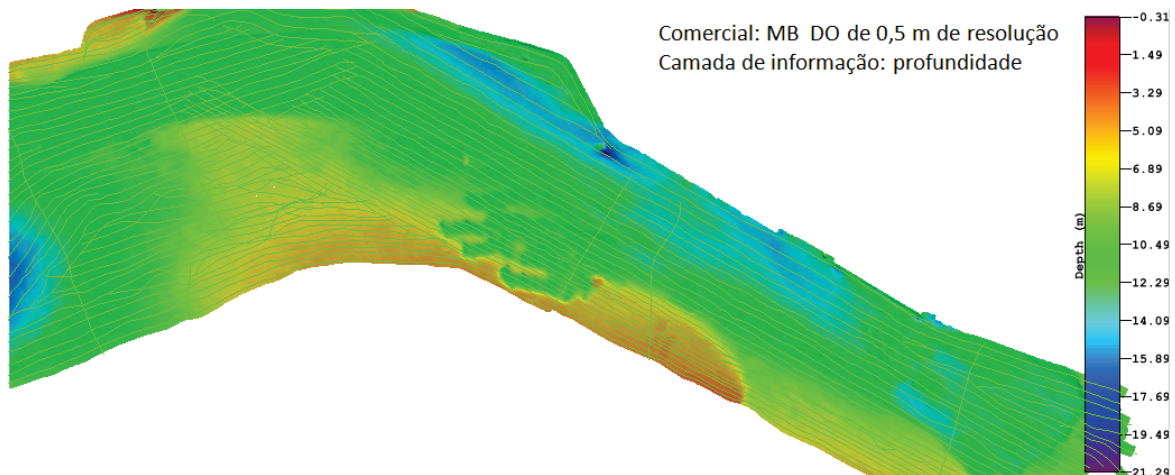


Figura 3.17 - MB 2-DO-Comercial-0,5m (profundidade)

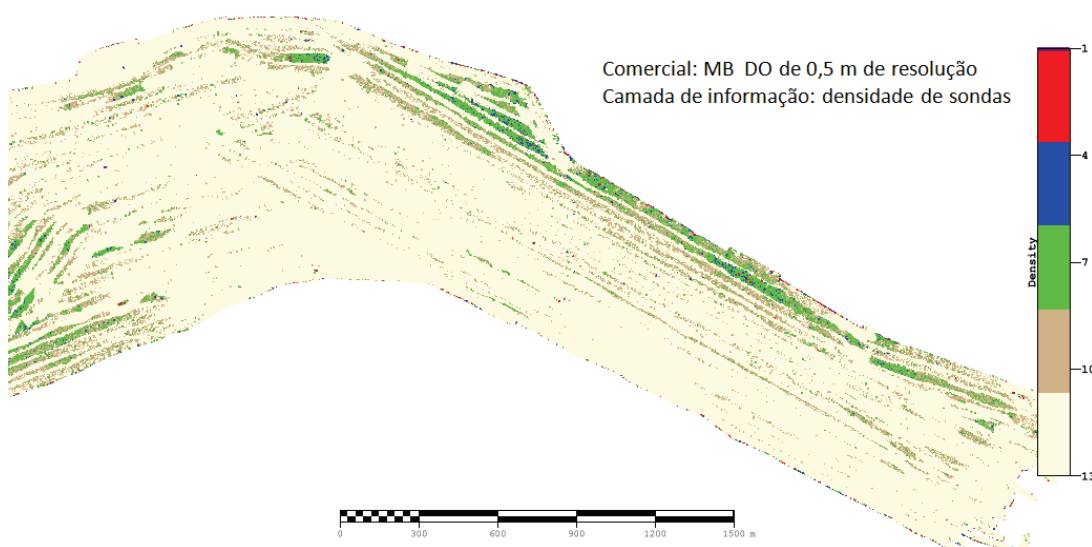


Figura 3.18 - MB 2-DO-Comercial-0,5m (densidade de sondas)

As Figuras 3.19, 3.20 e 3.21 ilustram as densidades de sondas adquiridas nos MB de Cobertura Completa nos quais se evidencia uma elevada densidade com registos pontuais de densidade inferior ao requerido pela NOAA, normalmente, em zonas de fronteira.

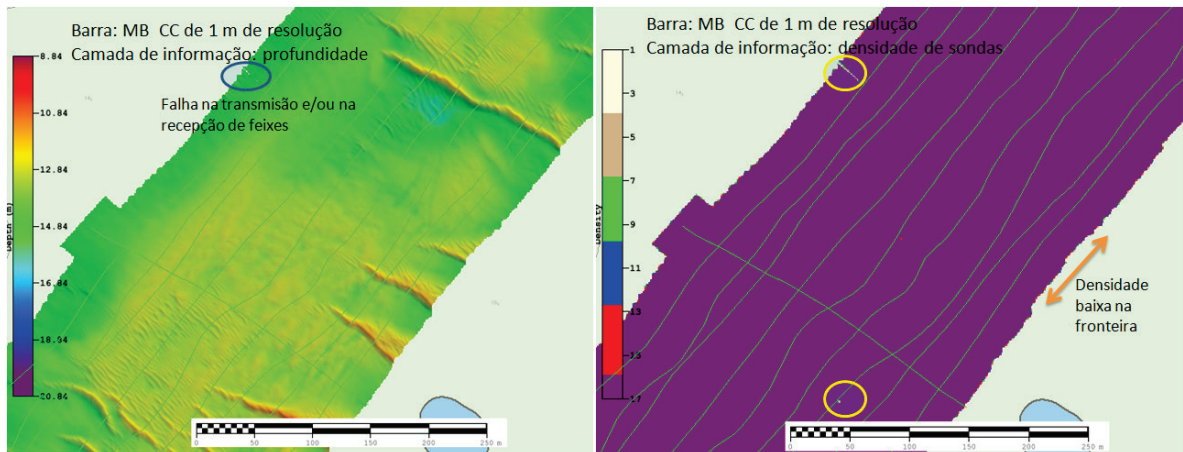


Figura 3.19 - MB 2-CC-Barra-1m (parcial)

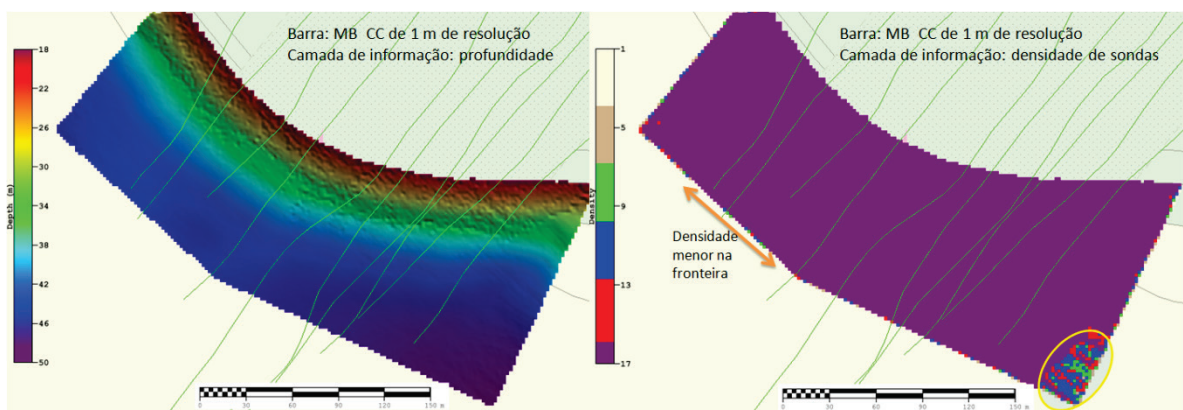


Figura 3.20 - MB 2-CC-Barra-2m

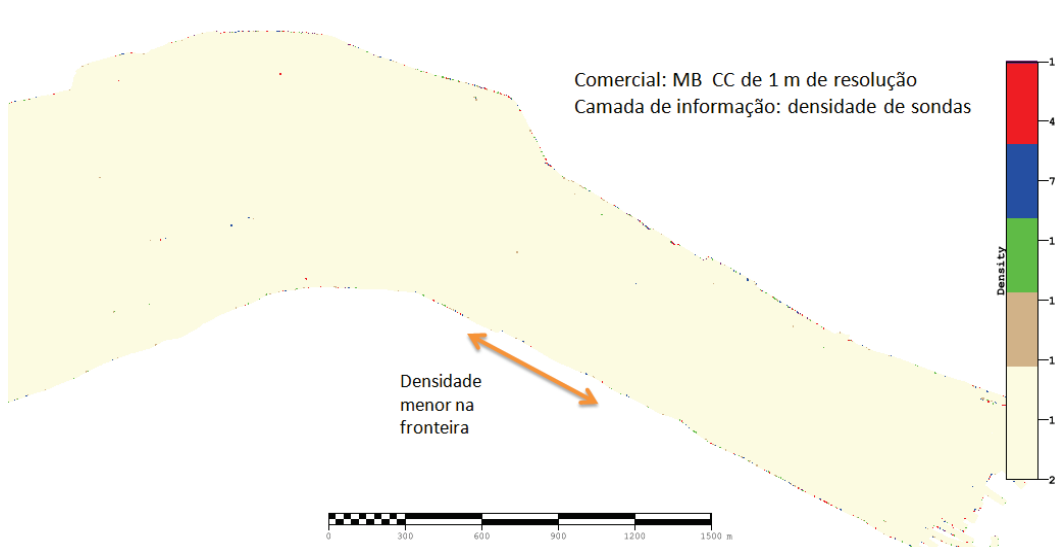


Figura 3.21 - MB 2-CC-Comercial-1m (densidade de sondas)

3.3.2.3 Camadas de informação do CUBE

Visualizando as diversas camadas de informação de um MB gerado pelo CUBE obtém-se informação que permite individualizar situações que merecem uma atenção maior. Desta forma, elimina-se a necessidade de visualizar todos os dados e, evidencia-se a necessidade de avaliar subconjuntos de dados com características anormais. A Figura 3.22 ilustra a Confiança nas Hipóteses (Hs) numa zona da área da Barra caracterizada pelo elevado declive de uma estrutura dunar, ilustrada na Figura 3.23. Observa-se que sobre esta estrutura a menor confiança traduz-se num aumento de hipóteses alternativas sobre o talude dunar.

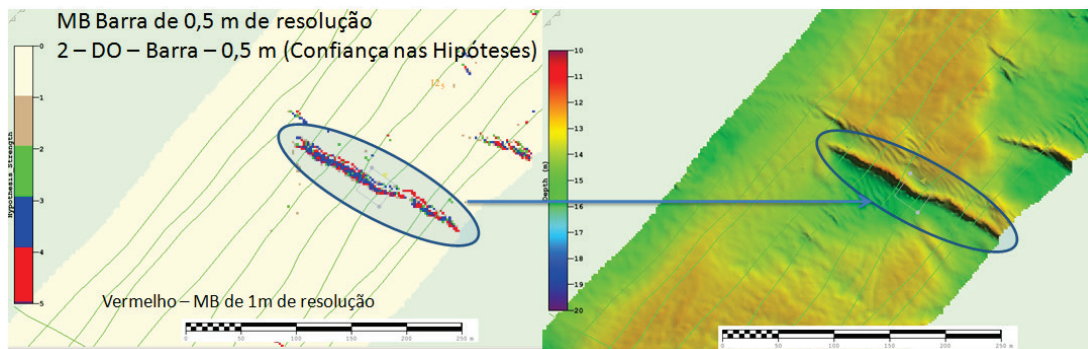


Figura 3.22 - Confiança nas Hipóteses numa zona dunar

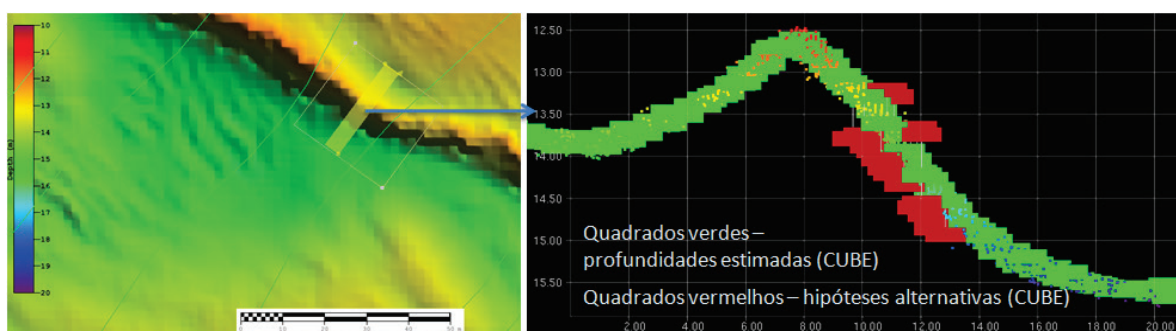


Figura 3.23 - Visualização das hipóteses numa zona dunar

De igual modo, as Figuras 3.24 e 3.25, ilustram uma situação idêntica, desta feita sobre a zona da entrada da Barra. Na presença de taludes de declive acentuado, por exemplo de 45° , um erro em posicionamento de 1 m (valor consonante com a actual incerteza total horizontal no posicionamento das sondas) pode representar-se em sondas localizadas na mesma posição com valores de 1 m de diferença em Z. Esta situação traduz-se nos MB pela existência de nodos com um elevado desvio padrão e, conseqüentemente, nodos com maior número de hipóteses e/ou menor confiança na profundidade estimada. No entanto, uma vez que o objectivo destes MB é a cartografia náutica, a situação descrita acaba por não ser relevante, uma vez que, em termos de segurança da navegação, o realce irá sempre para a parte do fundo marinho de menor profundidade adjacente ao talude. Como se constata na análise das figuras, na entrada da Barra a modelação batimétrica é consistente, traduzindo-se em valores baixos de desvio padrão e valores elevados de Confiança nas Hipóteses, excepto na zona de talude.

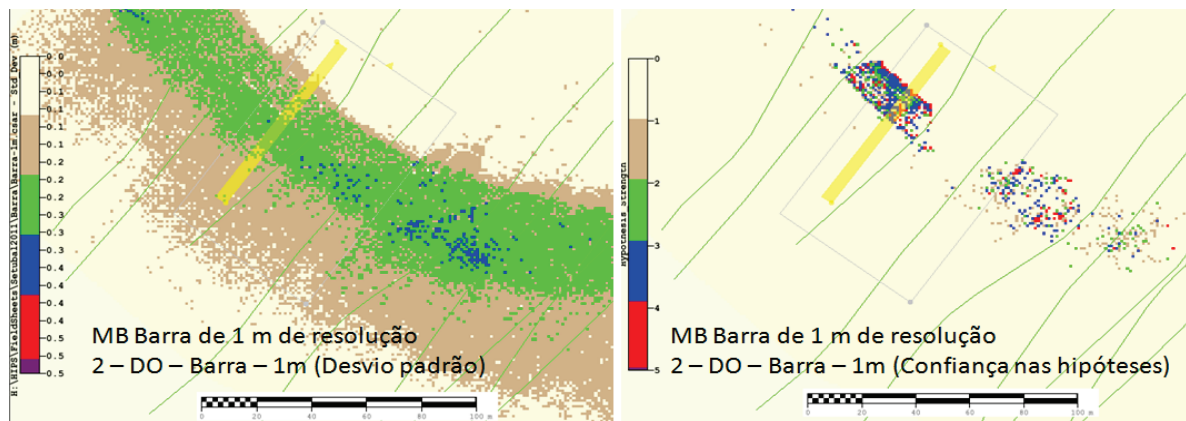


Figura 3.24 - Desvio Padrão e Confiança nas Hipóteses na entrada da Barra

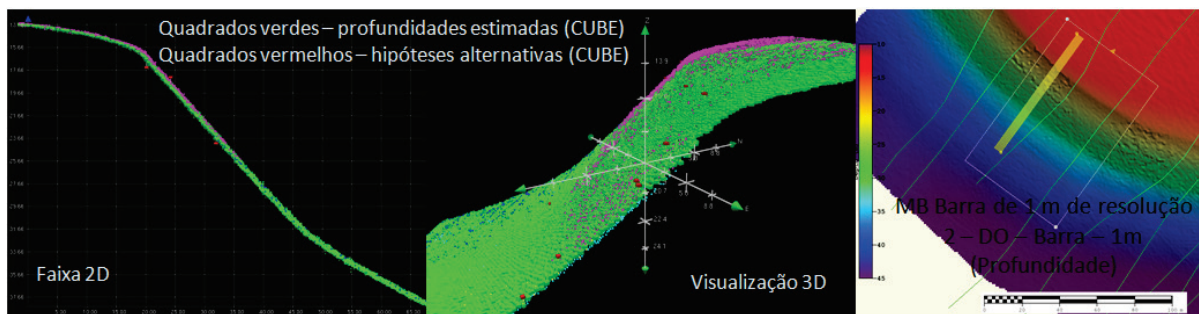


Figura 3.25 - Visualização das Hipóteses na entrada da Barra

A Figura 3.26 ilustra a camada de informação Número de Hipóteses do MB de 0,5 m de resolução da área Comercial, com realce de algumas situações de valores mais elevados.

As Figuras 3.27 e 3.28 ilustram as camadas de informação Confiança nas Hipóteses e Desvio Padrão para o mesmo MB da Figura 3.26. Estas figuras foram elaboradas após concluída a Validação do MB de modo a enfatizar a elevada consistência do MB gerado.

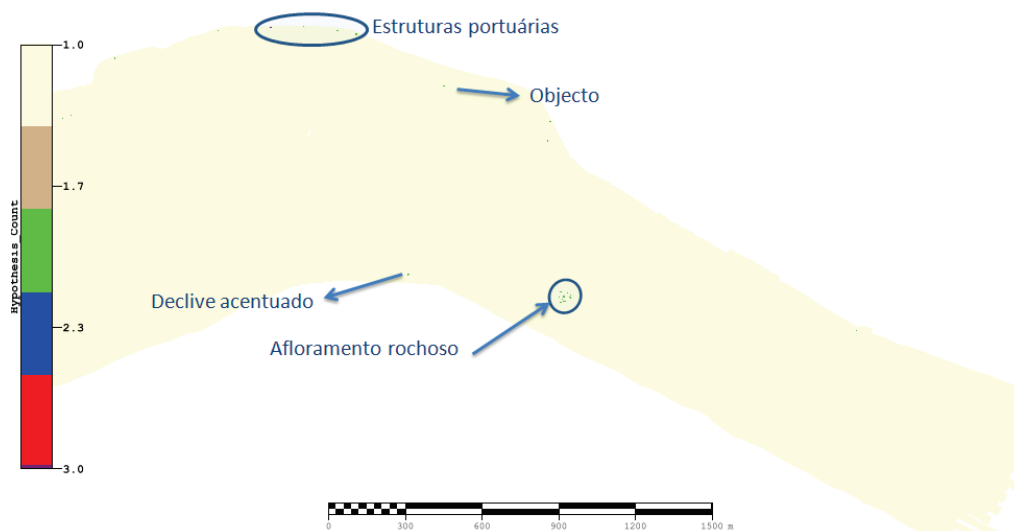


Figura 3.26 - Número de Hipóteses do MB de 0,5 m de resolução na área Comercial



Figura 3.27 - Confiança nas Hipóteses do MB de 0,5 m de resolução na área Comercial

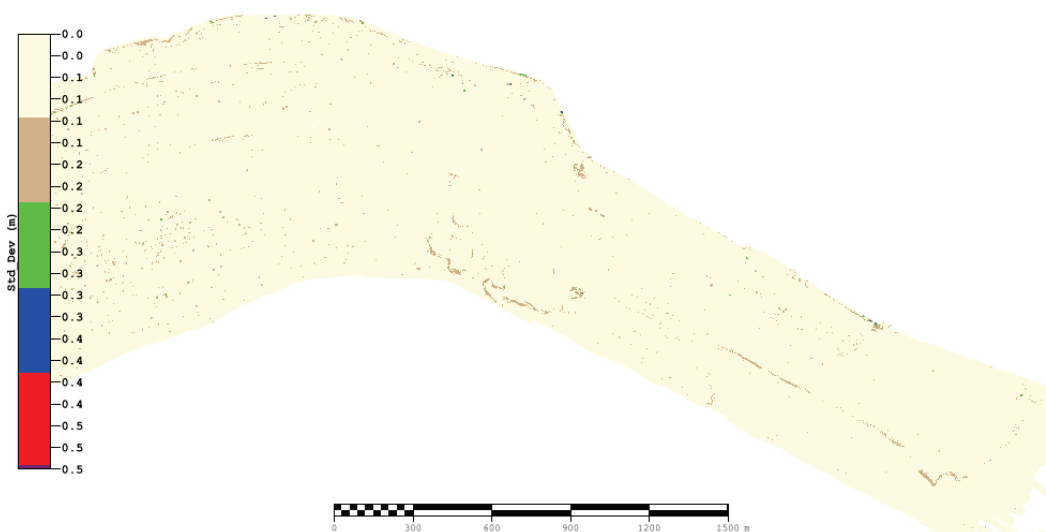


Figura 3.28 - Desvio Padrão do MB de 0,5 m de resolução na área Comercial

3.3.2.4 Designação de sondas

À medida que se efectuam os processos de Controlo de Qualidade e de Validação dos MB, o hidrógrafo vai detectando nos dados objectos, obstruções ou outras estruturas relevantes para a segurança da navegação. Incumbe-lhe verificar se a modelação efectuada garante os requisitos de segurança da navegação obedecendo às especificações dos MB exigidos pela NOAA (secção 2.6.2). As Figuras 3.29 e 3.30 ilustram um objecto correspondente a uma poita da bóia João Farto, com cerca de 70 cm de aresta. No MB de 0,5 m de resolução, ilustrado na Figura 3.29, a diferença entre a sonda mínima e a hipótese mais próxima é de cerca de 25 cm, valor este que é da grandeza da máxima incerteza vertical admissível para LH de Ordem Especial. No MB de 1 m de resolução, ilustrado na Figura 3.30, a diferença entre a sonda mínima e a hipótese mais próxima é de cerca de 40 cm, valor este que é ligeiramente inferior à máxima incerteza vertical admissível para LH de Ordem 1a.

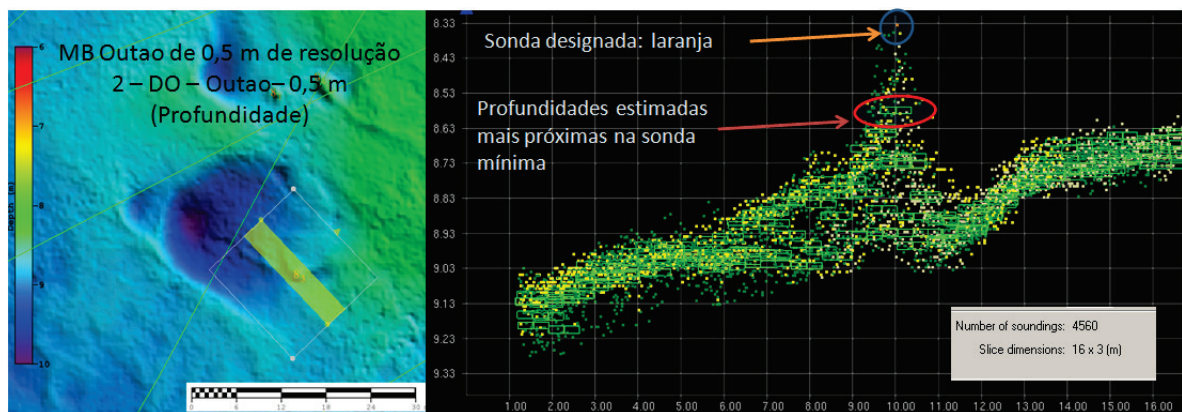


Figura 3.29 - Designação de sondas nos MB de Detecção de Objectos

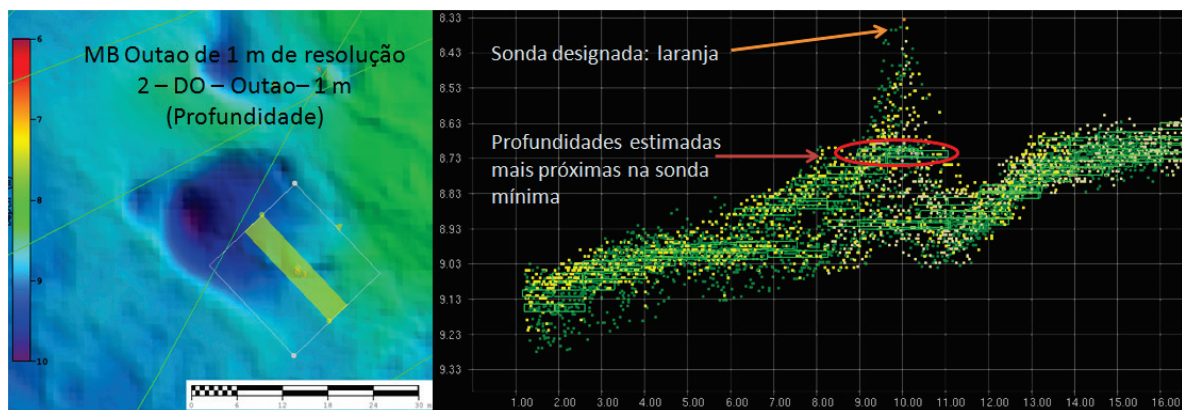


Figura 3.30 - Designação de sondas nos MB de Cobertura Completa

O critério para a designação de sondas depende do tipo de MB requerido (MBDO ou MBCC), no entanto, tal como referido nas especificações da NOAA, há a necessidade de passar de um MBCC para um MBDO, tal como é ilustrado nas Figuras 3.29 e 3.30. Tomando em consideração os requisitos dos LH de Ordem 1a, não seria necessário designar a sonda mínima. Caso o LH fosse de Ordem Especial seria necessário designar, uma vez que, a diferença entre a sonda mínima e a profundidade do MBDO é superior a metade da incerteza máxima admissível. De modo a analisar as potencialidades do CUBE na modelação de objectos, foram designadas as sondas mínimas de todas os objectos ou outras estruturas detectadas. Assim, ao longo do processamento de dados foram designadas 93 sondas na área Comercial, 41 na área Outao e uma na área Barra.

3.3.2.5 CUBE 3

Terminada a fase da Validação dos MB, os diversos MB são regenerados dando origem à Superfície Validada CUBE 3. Antes da criação dos Produtos Finais, e tal como referido na secção 3.3.1, foi criada a superfície de diferenças *Shoal_diff*. Esta superfície representa a diferença em Z num nodo entre a profundidade estimada e a sonda mínima capturada. Com esta superfície pretende-se avaliar a qualidade da estimação de profundidade e verificar a existência de alguma situação pontual em que os critérios de designação de sondas da NOAA (secção 2.6.2.1) não tenham sido cumpridos. A título de exemplo, as Figuras 3.31 e 3.32 ilustram as superfícies de diferenças *Shoal_diff* criadas na área da Barra a partir dos MB CUBE 3. A Figura 3.31 é representativa do MBDO da parte nordeste da área da Barra, zona onde predominam estruturas dunares que atingem, por vezes, cerca de 4 m de altura. As diferenças significativas, ou seja, maiores que a incerteza máxima admissível, foram registadas nas frentes dunares de maior declive. Apesar dos valores das diferenças, nestas situações não foi designada nenhuma sonda dada a conformidade entre a estimação e as medições nos topos das dunas, garantindo a segurança da navegação. De igual modo, na entrada da barra (Figura 3.32) apesar das diferenças significativas registadas na zona de talude, não existem consequências para a segurança da navegação por, na zona de menor profundidade, imediatamente a seguir ao talude, existir conformidade entre a estimação e as medições.

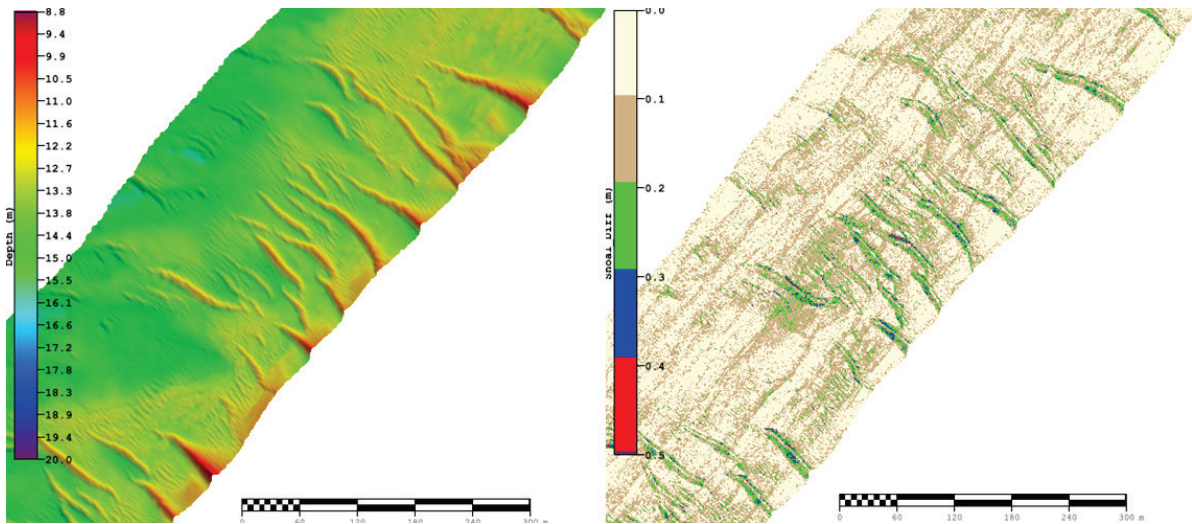


Figura 3.31 - Superfície de diferenças *Shoal_diff* (Barra)

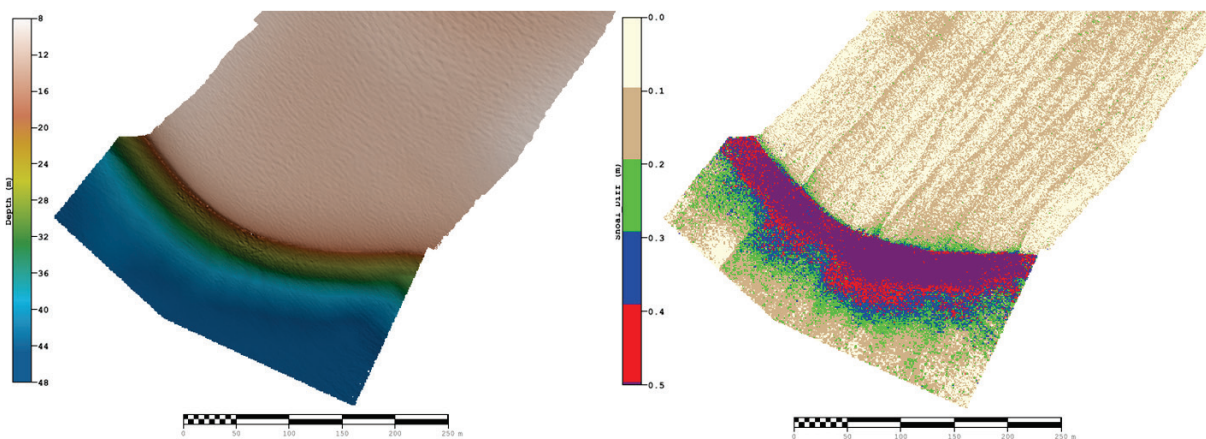


Figura 3.32 - Superfície de diferenças *Shoal_diff* (entrada da Barra)

3.3.3 Produtos Finais (Setúbal)

Dos MB correspondentes às superfícies validadas (CUBE 3), foram gerados diversos MB finais (CUBE 4). Cada um destes MB é limitado às profundidades adequadas à resolução do MB e incluem as sondas designadas. A incerteza final adoptada consiste na selecção do maior valor entre a incerteza estimada, baseada no modelo preditivo, e o desvio padrão das sondas contribuintes para o valor estimado de profundidade nodal, propagado a um nível de confiança de 95%.

Tal como referido na secção 3.4.1 foram ainda criadas superfícies de diferença *Depth_FinalUnc*. Estas superfícies resultam da subtracção à *Depth* da CUBE 3 da *Uncertainty* da CUBE 4.

Para além dos produtos descritos, foram ainda elaboradas superfícies combinadas, referidas como *Combine Surfaces* (CARIS, 2011a) de modo a criar MB finais únicos, independentes da profundidade e com uma única resolução. Numa superfície combinada a resolução do MB resultante não pode ser maior que a menor resolução dos MB que deram origem à combinação (CARIS, 2011a). Na degradação da resolução é dada primazia à profundidade mínima dos nodos que são combinados garantindo os propósitos da cartografia náutica, ou seja, se um conjunto de 4 nodos do MB original for transformado num único nodo no MB combinado, então, esse nodo assume como valor de profundidade a menor profundidade do MB original. Por outras palavras, os MB resultantes da combinação de superfícies não são mais do que uma generalização e combinação dos modelos originais podendo considerar-se produtos de base cartográfica (CARIS, 2011a). As superfícies combinadas têm por princípio a perda de detalhe no desenho do relevo acautelando, no entanto, a preservação das profundidades mínimas. A utilização destas superfícies prende-se com três razões fundamentais:

- Necessidade de criar uma IG a partir da informação dos MB que fosse comparável com as IG geradas no processamento tradicional
- Necessidade de gerar um único produto que fosse mais flexível e mais fácil de manusear, ou seja, que ocupasse menor espaço em disco e que servisse, igualmente, os requisitos da cartografia náutica
- Por fim, o IH não possui nenhum normativo nem aplicações para a geração da superfície de navegação referida no Capítulo 1 e utilizada pela NOAA como produto de base cartográfica, pelo que, considerando as aplicações utilizadas no IH para o processamento de dados de base cartográfica, optou-se pela geração das superfícies combinadas

A partir dos MB CUBE 4 (produtos finais do LH) enumerados na Tabela 3.2, elaboraram-se MBCC e MBDO combinados de resolução de 2 e 1 m, respectivamente. Na designação dos novos produtos foi utilizada a nomenclatura Cobertura-Resolução-Setubal, em que:

- Cobertura assume os valores de MBDO ou MBCC
- Resolução corresponde à resolução do modelo combinado, ou seja, 1 ou 2 m, sendo escrita da forma 1m ou 2m, respectivamente

No caso dos MB conservativos, ou seja, resultantes da combinação da camada de informação *Depth_FinalUnc*, é acrescentada a letra C no início da designação.

As profundidades dos MB combinados de Setúbal foram exportadas para um ficheiro de trabalho do CARIS GIS 4.5 (CARIS, 2011b). Nesta aplicação foi utilizado o algoritmo de supressão de profundidades de modo a produzir uma IG legível. Nas IG do LH, elaboradas à escala 1:5 000 foi garantido um espaçamento mínimo entre as sondas igual a 4 mm na IG (correspondente a 20 m no terreno).

Estas IG permitirão uma comparação mais específica com as IG descritas em Instituto Hidrográfico (2011), com vista à verificação de alguma situação em que a segurança da navegação possa ser colocada em causa quando da utilização dessas superfícies como PBF.

A partir das profundidades representadas nas IG foram elaborados MB de malha TIN, de modo a gerar as isóbatas, espaçadas de metro a metro até às profundidades de 30 m e, de 5 em 5 metro, em maiores profundidades, tal como é efectuado no processamento tradicional.

3.4 Comparação dos MB com os PBF tradicionais do LH

A comparação estatística entre os MB finais e os PBF tradicionais foi efectuada com recurso à ferramenta QCReport (CARIS, 2011a). Esta compara as sondas do PBF tradicional do LH com os MB (profundidades dos nodos). O PBF tradicional do LH de Setúbal constituído por um subconjunto de 839685 sondas validadas pelo hidrógrafo, cada uma correspondendo a uma sonda mínima por cada célula de 2 x2 m (Tabela 3.1). De igual modo, foram comparadas as sondas do PBF tradicional seleccionadas para constar nas IG do LH definidas em Instituto Hidrográfico (2011), correspondendo a uma selecção de 16243 sondas.

A avaliação do processamento com o CUBE para a cartografia náutica não pode, de forma alguma, limitar-se à informação estatística da comparação efectuada entre os produtos gerados. De modo a garantir a segurança da navegação é ainda necessário analisar as diferenças específicas entre as sondas validadas no processamento tradicional e as estimações de profundidade em zonas com objectos, obstruções ou outras estruturas relevantes.

De acordo com OHI (2000) uma estrutura significativa ou relevante do fundo do mar é aquela que tem uma elevação relativamente às profundidades circundantes maior que 10% da profundidade em fundos menores que 10 m ou, maior que 1,0 m em fundos entre 10 e 30 m ou ainda, maior que 10% da profundidade menos 2 m em fundos superiores a 30 m. OHI (2008) define como requisitos mínimos de detecção, os objectos cúbicos com 1 m ou com 2 m de aresta nos LH de Ordem Especial ou Ordem 1a, respectivamente. O Instituto Hidrográfico (2008a) adoptou estes requisitos. O Serviço Hidrográfico da Nova Zelândia (LINZ⁴⁵, 2010) define como uma estrutura significativa ou relevante aquela que possua dimensões superiores a 10 % da profundidade em fundos inferiores a 10 m ou, maiores que 1 m em fundos entre 10 e 40 m ou ainda, uma súbita variação de 10% da profundidade em fundos superiores a 40 m.

A NOAA (2010b) adopta os requisitos mínimos de detecção de objectos definidos pela OHI (2008) e especifica que os MB que constituem o produto final dos LH devem garantir a representação adequada dos seguintes objectos (secção 2.6.2):

- Nos MBDO: objectos cúbicos com 1 m de aresta até aos 20 m de profundidade ou arestas de 5% da profundidade em profundidades superiores
- Nos MBCC: objectos com 2 m de aresta na componente horizontal e 1 m de aresta na componente vertical até às profundidades de 20 m. Para profundidades superiores é requerido o factor dimensional de 10% da profundidade horizontalmente, e de 5% da profundidade na dimensão vertical

Um objecto pode ser detectado na aquisição de dados e assimilado num determinado MB, no entanto, a sua representação pode não ser suficiente para garantir a segurança da navegação. Neste contexto, a NOAA estabeleceu ainda critérios para a designação de sondas (secção 2.6.2.1) quando a profundidade estimada na modelação batimétrica seja separada de um degrau vertical significativo relativamente às sondas mínimas observadas. Realça-se ainda um pormenor de extrema importância salvaguardado pela NOAA. Os requisitos para a designação de sondas devem ter em consideração a escala do LH. Se for detectado um conjunto de objectos suficientemente próximos (distância inferior a 2 mm na escala do LH) que não tenham sido devidamente assimilados pelo MB, apenas a sonda

⁴⁵ LINZ é o acrónimo de *Land Information New Zeland*. As especificações mencionadas são reconhecidas internacionalmente como um documento de referência, uma vez que foram elaboradas pelo *Ocean Mapping Group*.

mínima mais relevante para a segurança da navegação dentro do conjunto de objectos detectado deve ser designada (NOAA, 2011b). Na presença de fundos muito irregulares, esta situação minimiza a necessidade de designar um elevado número de sondas.

No LH de Setúbal foram analisados os MB gerados nos produtos finais de modo a avaliar se representam, adequadamente, os objectos e as estruturas detectados na aquisição de dados e relevantes para a segurança da navegação. Esta certificação foi efectuada com as ferramentas de visualização e edição 2D e 3D associadas à aplicação CARIS-HIPS.

4. Resultados e discussão

4.1 Barra do porto de Lisboa

No processamento de dados do LH da área de estudo da barra do porto de Lisboa, não foram detectadas situações em que fosse necessário designar sondas. Assim, com a aplicação QC-REPORT (CARIS, 2011a) foi efectuada a comparação do PBF do LH com a superfície batimétrica CUBE 3, cujos resultados estão expressos na Tabela 4.1. As colunas Ordem Especial e Ordem 1a apresentam a percentagem de diferenças inferiores às máximas incertezas admissíveis para aquelas ordens de LH. Um valor médio negativo significa que a superfície é, em média, mais profunda que o PBF.

Tabela 4.1 – Resultados da comparação entre o PBF de 2007 e as superfícies CUBE 3

Resolução	Comparações	Max (m)	Min (m)	Valor Médio (m)	Desvio Padrão (m)	Ordem Especial	Ordem 1a
0,5 m	893820	0,301	-0,510	-0,059	0,03	99,99 %	100,00 %
1 m	894438	0,367	-0,426	-0,065	0,03	99,99%	100,00 %
2 m	895065	1,365	-1,605	-0,073	0,04	99,91 %	99,97 %

Da análise dos resultados observa-se que as diferenças entre o PBF e as superfícies CUBE são inferiores à máxima incerteza admissível⁴⁶ (29 e 56 cm para LH de Ordem Especial e Ordem 1, respectivamente, e para uma profundidade de 20 m). As menores diferenças são obtidas pelas superfícies de 1 m e 0,5 m. As diferenças mais relevantes, superiores à incerteza dos nodos, foram encontradas na área nordeste do LH, mais irregular e caracterizada por estruturas dunares (Figura 4.1). Estas diferenças devem-se à maior dificuldade por parte do CUBE em modelar zonas de maior irregularidade, nomeadamente, nos MB de menor resolução mas, estão também relacionadas com as limitações do processamento tradicional e com o conservadorismo do hidrógrafo.

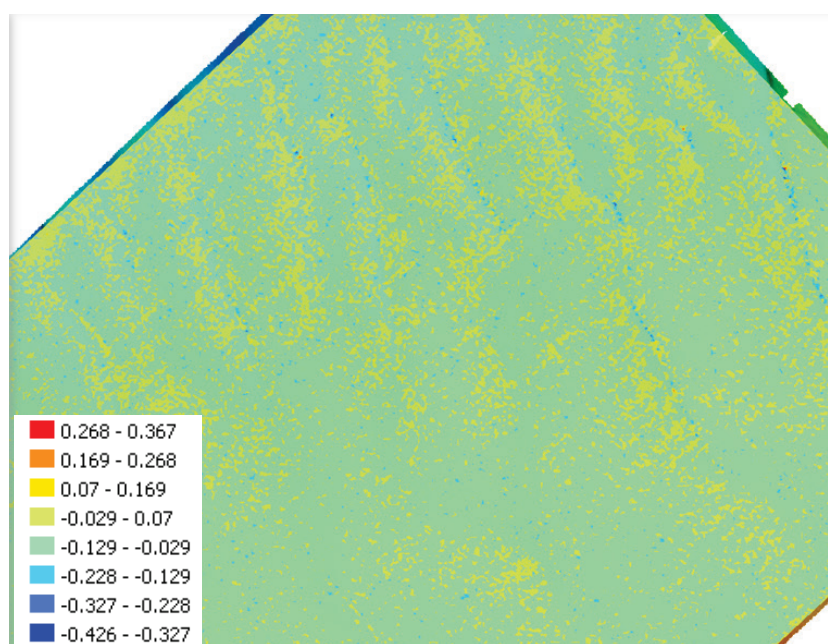


Figura 4.1 - Diferenças (m) entre o PBF de 2007 e a superfície de resolução 1 m

⁴⁶ Ver Apêndice A.

Na Figura 4.2, a imagem da esquerda, representa a camada de informação de profundidade da superfície CUBE de resolução 1 m. A imagem da direita representa a camada de informação de desvios padrão (intervalo de 0 a 0,34 m), sendo visível que os maiores valores estão associados aos taludes dunares.

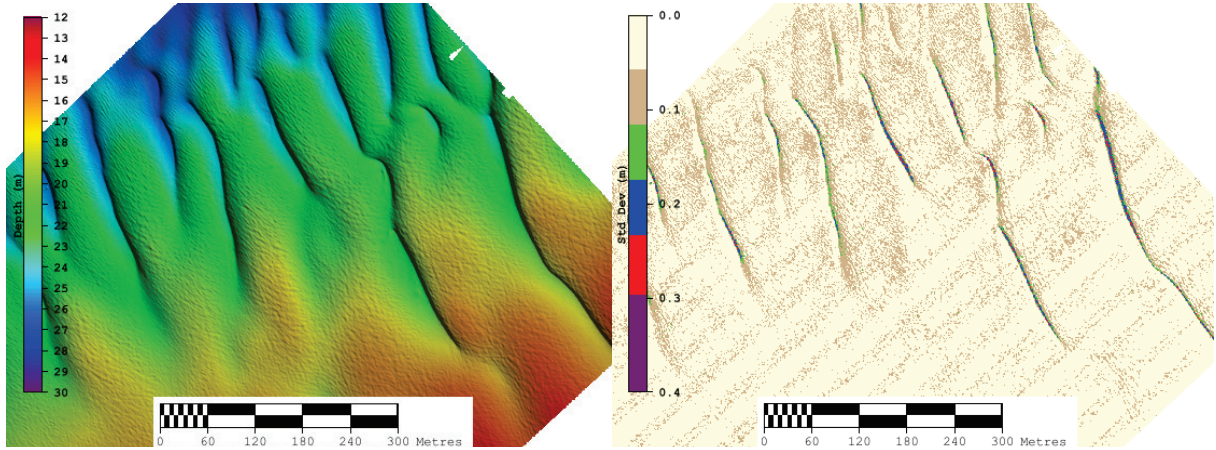


Figura 4.2 - Camadas de informação de profundidade e de desvio padrão

Na Figura 4.3, a imagem da esquerda, representa a camada de informação Número de Hipóteses onde é visível que, com excepção das zonas de elevado declive dunar, o CUBE apresenta apenas uma hipótese de solução. A imagem da direita representa a camada de informação Confiança nas Hipóteses, com a relevância de mostrar que, mesmo nas situações em que existem hipóteses alternativas, o CUBE tem máxima confiança na solução de profundidade seleccionada.

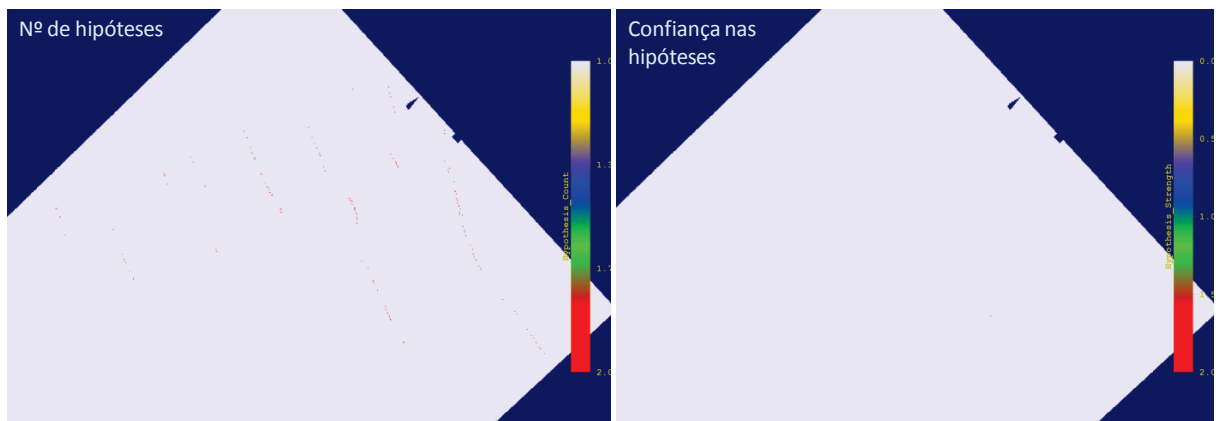


Figura 4.3 - Camadas de informação número e confiança nas hipóteses

Por fim, pode concluir-se que os MB de 0,5 m e de 1 m servem os propósitos da cartografia náutica. Esta área de estudo apresenta um fundo regular, razão pela qual, não se verificam diferenças significativas quando comparados entre os MB de resolução de 0,5 m e de 1 m. No entanto, realça-se a baixa densidade de sondas adquirida por nodo, resultante da parametrização do SMF utilizada na época do LH, que inviabiliza o cumprimento dos requisitos dos MBDO definidos pela NOAA.

4.2 Selvagem Grande

Este LH tem falhas de cobertura (Ordem 2) e o fundo marinho apresenta diversos afloramentos rochosos com grande variabilidade de profundidade. Estas situações levaram à necessidade de designar um número significativo de sondas de forma a salvaguardar a segurança da navegação.

A Tabela 4.2 ilustra as diferenças da comparação do subconjunto de sondas mínimas do PBF com as superfícies CUBE 4.

Tabela 4.2 – Comparação entre as superfícies CUBE 4 e o PBF da Selvagem Grande

Resolução (m)	Nodos	Área (km ²)	Profundid. (m)	Comparações	Max (m)	Min (m)	Valor Médio (m)	Desvio Padrão (m)	Ordem 1 (%)	Ordem 2 (%)
1,0	1372352	1	0 - 22	88598	4,3	-11,5	-0,24	0,33	90,33	-
2,0	2962552	11	20 - 60	197386	10,4	-35,9	-0,33	0,81	91,22	-
4,0	1332868	21	55 - 105	133319	8,6	-23,4	-0,37	0,74	93,30	-
8,0	136923	8	95 - 210	20470	23,1	-87,8	-0,54	2,65	-	94,61
16,0	98123	25	190 - 525	12474	60,7	-125,3	-1,89	5,81	-	88,84
32,0	32411	33	475 - 900	3867	38,8	-134,0	-3,32	8,90	-	91,54
64,0	6498	26	810 - 1600	1339	67,8	-84,6	-4,66	12,82	-	92,31

Na Tabela 4.2, observa-se que a superfície com piores resultados (CUBE de 16 m de resolução) corresponde no terreno a uma área de declive acentuado, onde os fundos aumentam rapidamente dos 200 para os 500 m. Ressalva-se que este tipo de áreas é dos mais difíceis de processar na forma tradicional (avaliação dos dados *versus* visualização disponível) observando-se, uma vez mais, o conservadorismo dos hidrógrafos. Pode-se afirmar que, de uma forma geral, a estatística efectuada revela que as superfícies se assemelham ao PBF do LH. No entanto, existe uma percentagem significativa de profundidades, que para efeitos de segurança da navegação, não é estatisticamente compatível com as sondas do PBF.

De modo a avaliar a adequabilidade da modelação batimétrica para a cartografia náutica, foi construído um MNE de malha TIN para a geração das isóbatas, a partir das profundidades das superfícies CUBE. Comparando as isóbatas assim obtidas com as construídas a partir do PBF do LH, para representação na CN 36407, verifica-se que o seu grafismo se adequa à forma das estruturas já representada (Figura 4.4A). Analisando as sondas representadas na CN que apresentam diferenças com um valor superior ao da incerteza nodal relativamente às profundidades das superfícies, observa-se que a maioria dos casos provém do conservadorismo do hidrógrafo, realçando-se a necessidade de designar sondas, nomeadamente, em zonas de deficiente cobertura ou com fraca densidade de dados. As maiores diferenças registam-se nas zonas de transição abrupta dos afloramentos rochosos para as zonas de plataforma (Figura 4.4B) observando-se, nestes casos, numerosos ecos falsos (múltiplos trajectos do raio sonoro e detecção através de lóbulos secundários) de difícil análise e processamento que, em regra, não produzem valores anómalos relativamente à informação circundante no processamento tradicional. As superfícies apresentam valores consistentes de profundidade, desde que exista uma cobertura efectiva e uma densidade de dados suficientemente robusta na parte superior dos afloramentos rochosos, para que as profundidades estimadas tenham valores próximos das sondas mínimas, isto é, de diferença inferior à incerteza máxima admissível.

A Figura 4.5 ilustra a conformidade dos MB com a informação da CN. As linhas (isóbatas) e os números (sondas) a sombreado correspondem à informação da CN. Os números a negro correspondem às profundidades dos MB finais (CUBE 4).

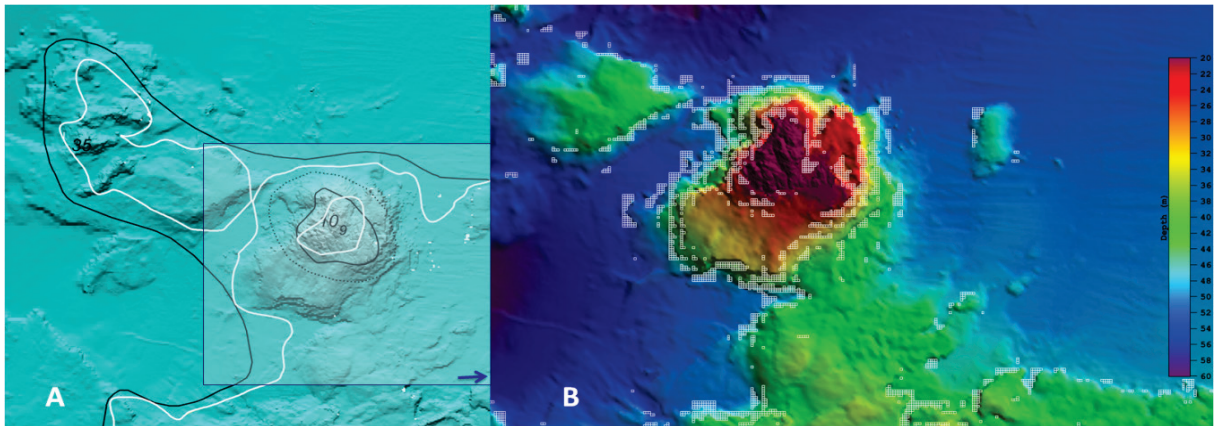


Figura 4.4: **A** - Nível de generalização das isóbatas da superfície CUBE (linha a branco) versus isóbata representada na CN 36407 (linha escura); **B** - Identificação das zonas (quadrados brancos) com diferenças significativas entre o PBF do LH e a CUBE

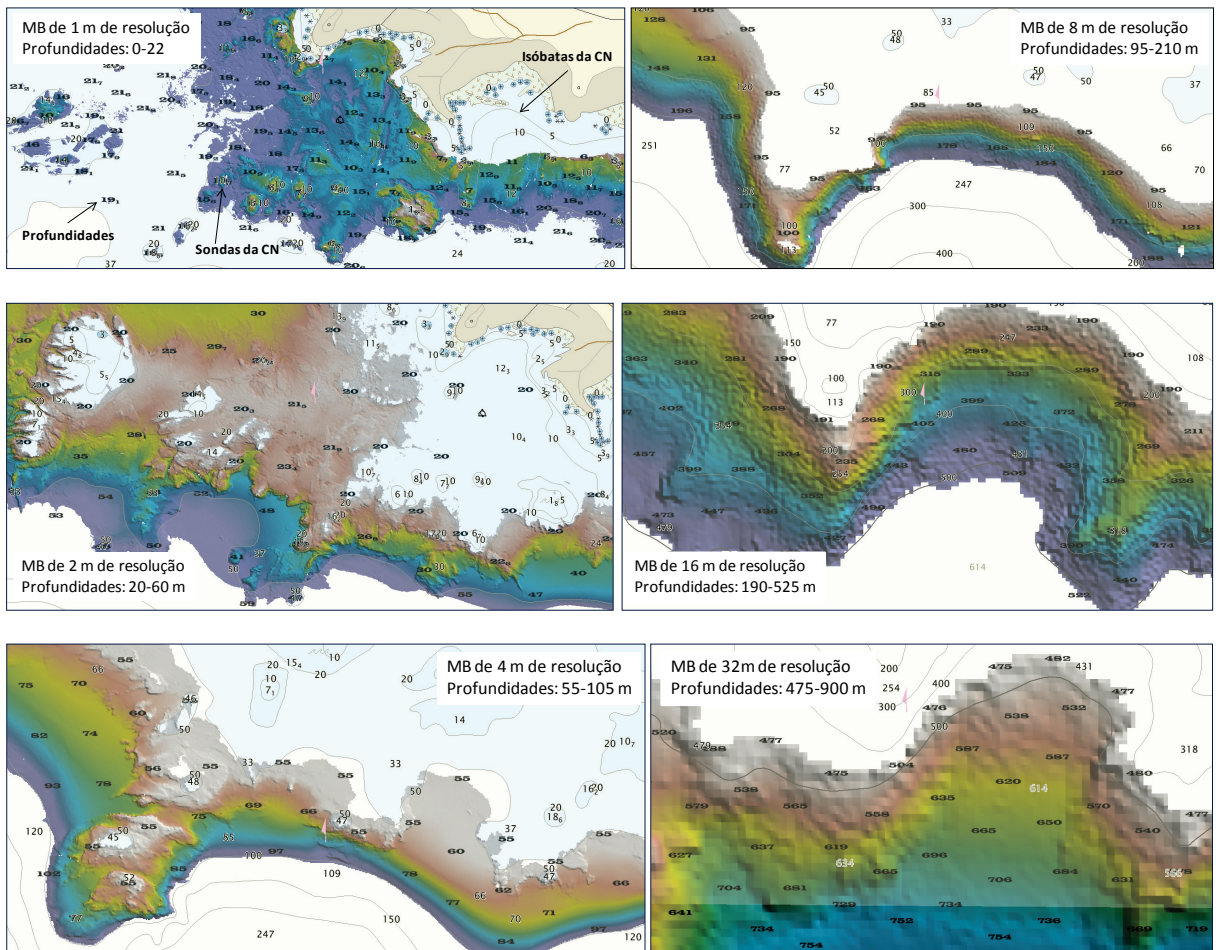


Figura 4.5 - MB das Selvagens com sobreposição da informação da CN

4.3 Barra e porto de Setúbal

Terminado o processamento de dados do LH realizado em Setúbal foi efectuado o BASE QCReport dos MB CUBE 3, utilizando a metodologia referida na secção 3.3.1. As Tabelas 4.3 e 4.4 ilustram os resultados obtidos. Comparativamente às Tabelas C.6 e C.7 do Apêndice C, realça-se:

- Maior número de *holidays* fruto do processamento de dados
- Idêntica percentagem de nodos que satisfazem os critérios da OHI quando comparada a estatística da CUBE3 com a da CUBE 2, excepto um aumento significativo dos nodos que cumprem os critérios de Ordem Especial no MB 3-DO-Comercial-0_5m.

Este último facto deve-se ao processamento de dados efectuado junto às estruturas portuárias, maioritariamente localizadas nesta área e mais susceptíveis a gerar ecos falsos (multitrajecto e lóbulos secundários), justificando-se desta forma a necessidade de, mesmo no processamento com o CUBE, realizar tarefas manuais ou interactivas de validação de dados.

Tabela 4.3 – Resultados da BASE QCReport sobre a CUBE 3 (MBDO)

		Modelos Batimétricos de Detecção de Objectos				
		3-DO-Barra-0_5m	3-DO-Barra-1m	3-DO-Outao-0_5m	3-DO-Outao-1m	3-DO-Comercial-0_5m
Profundidade		0 – 20	18 - ...	0 – 20	18 - ...	0 – 20
N.º de nodos existente no MB		5073199	54914	9567354	2307803	13636694
N.º de nodos povoados		5072800 (99,99%)	54869 (99,92%)	9545993 (99,78%)	2304803 (99,87%)	13623524 (99,90%)
N.º de <i>holidays</i> detectados		33	6	233	58	67
Ordem especial	N.º de nodos considerados	5072800	32693	9545993	2152965	13623079
	Satisfazem critérios	5002140 (98,60%)	21257 (65%)	9304990 (97,5%)	2026959 (94,15%)	13582022 (99,70%)
	Média residual	-0,083	-0,010	-0,083	-0,089	-0,086
Ordem 1a	N.º de nodos considerados	5072800	54869	9545993	2304803	13623079
	Satisfazem critérios	5071106 (99,97%)	54754 (99,79%)	9535869 (99,89%)	2303818 (99,96%)	13622519 (100,00%)
	Média residual	-0,344	-0,370	-0,345	-0,386	-0,342

Tabela 4.4 – Resultados da BASE QCReport sobre a CUBE 3 (MBCC)

		Modelos Batimétricos de Cobertura Completa				
		3-CC-Barra-1m	3-CC-Barra-2m	3-CC-Outao-1m	3-CC-Outao-2m	3-CC-Comercial-1m
Profundidade		0 – 20	18 - ...	0 – 20	18 - ...	0 – 20
N.º de nodos existente no MB		1272386	13938	2395968	577537	3413844
N.º de nodos povoados		1272373 (100,00%)	13933 (99,96%)	2391693 (99,82%)	576945 (99,90%)	3411163 (99,92%)
N.º de <i>holidays</i> detectados		2	1	59	25	17
Ordem especial	N.º de nodos considerados	1272373	8295	2391693	538979	3411043
	Satisfazem critérios	1227710 (96,49%)	5441 (65,59%)	2258443 (94,43%)	471996 (87,57%)	3391771 (99,44%)
	Média residual	-0,079	-0,023	-0,076	-0,074	-0,085
Ordem 1a	N.º de nodos considerados	1272373	13933	2391693	576945	3411043
	Satisfazem critérios	1272355 (100,00%)	13918 (99,89%)	2391250 (99,98%)	576921 (100,00%)	3411039 (100,00%)
	Média residual	-0,339	-0,372	-0,338	-0,371	-0,342

Realçam-se ainda, a vermelho, os valores que representam valores estatísticos não conformes com as especificações dos LH. Estes valores ocorrem em zonas de fundo mais irregular. Nestas zonas o CUBE tem maior dificuldade em efectuar uma estimação da profundidade estatisticamente mais consistente, por assumir uma distribuição normal das sondas. Por outro lado, os MBCC têm apenas cerca de um quarto dos nodos relativamente aos MBDO pelo que, estatisticamente, são mais sensíveis ao comportamento geral. Sendo a incerteza final resultado do maior valor entre a incerteza do modelo preditivo e o desvio padrão das observações, justifica-se a existência dos valores assinalados, os quais são mais relevantes em fundos mais irregulares e nos MB de menor resolução, como é visível na Figura 4.6.

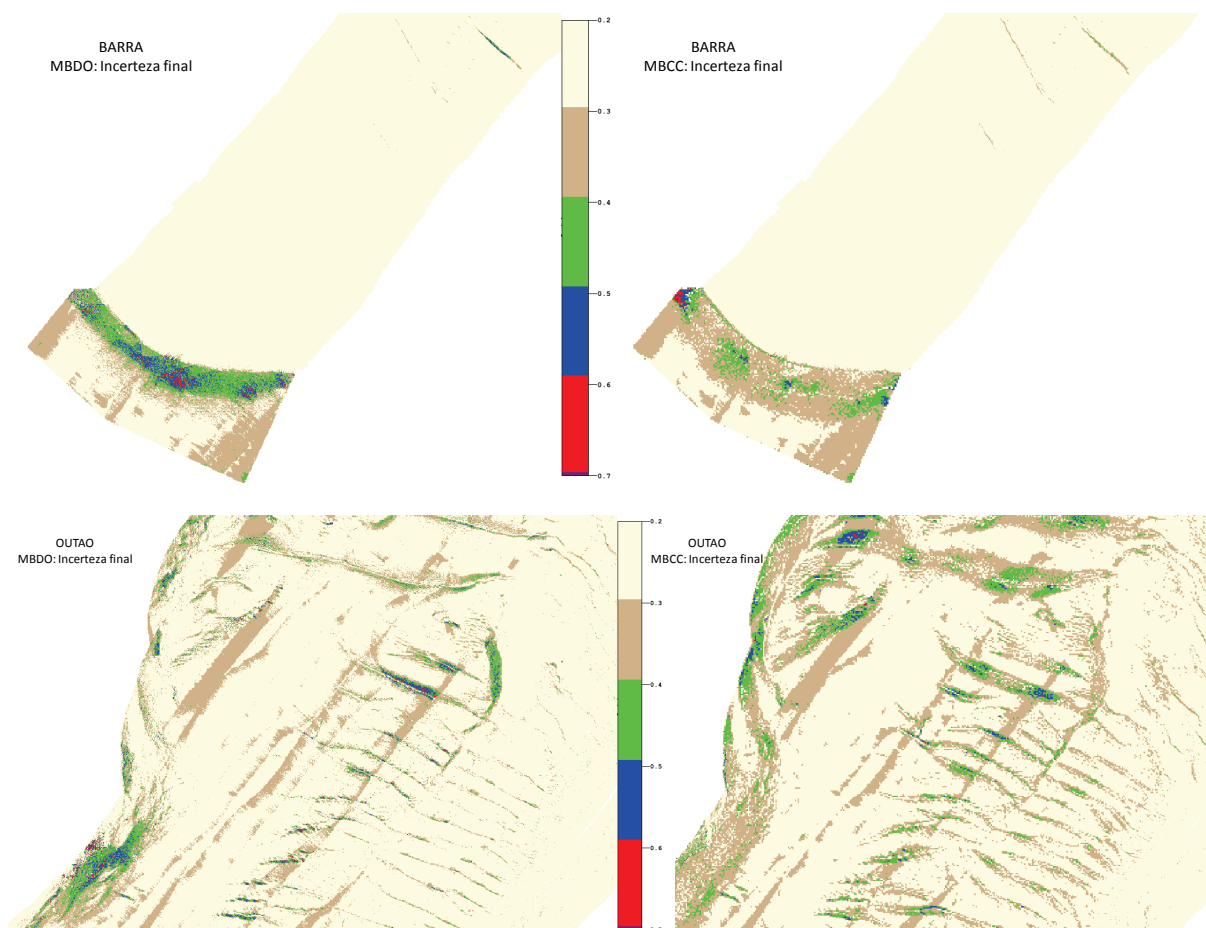


Figura 4.6 – Incerteza final dos MB CUBE 4

As subsecções seguintes mostram os resultados obtidos na comparação dos MBDO e dos MBCC, gerados no processamento do LH de Setúbal, com o PBF tradicional e também com as sondas representadas nas IG tradicionais, através da ferramenta QCReport (CARIS, 2011a).

4.3.1 Área Barra

A Tabela 4.5 ilustra os resultados obtidos da comparação do PBF tradicional com os MB gerados na Barra, ao longo das diversas fases de processamento. A Figura 4.7 ilustra as percentagens de comparações efectuadas cujas diferenças são inferiores à incerteza máxima admissível (Apêndice A), para LH de Ordem Especial e de Ordem 1a.

Tabela 4.5 – Comparação do PBF tradicional com os MB (área Barra)

	Z _{Min} (m)	Z _{Max} (m)	N.º Comparações	Max (m)	Min (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)	Falham O. Especial	Falham O. 1a
2-DO-Barra-0_5m	8,81	20,00	110068	0,25	-0,78	-0,09	0,05	99,58	99,99	459	8
2-DO-Barra-1m	18,00	48,40	5732	0,37	-0,92	-0,14	0,12	94,42	99,69	320	18
2-CC-Barra-1m	8,84	20,00	110086	0,84	-1,06	-0,11	0,06	99,31	99,98	765	23
2-CC-Barra-2m	18,00	48,40	5781	0,97	-1,25	-0,15	0,21	87,74	96,70	709	191
3-DO-Barra-0_5m	8,81	20,00	110053	0,25	-0,87	-0,09	0,05	99,59	99,98	457	18
3-DO-Barra-1m	18,00	48,31	5737	0,46	-0,98	-0,14	0,12	94,63	99,63	308	21
3-CC-Barra-1m	8,85	20,00	110081	0,47	-1,03	-0,11	0,06	99,28	99,98	789	25
3-CC-Barra-2m	18,00	48,26	5784	1,03	-1,44	-0,15	0,21	87,40	96,58	729	198
4-DO-Barra-0_5m	8,81	20,00	110053	0,25	-0,87	-0,09	0,05	99,59	99,98	457	18
4-DO-Barra-1m	18,00	48,31	5737	0,46	-0,98	-0,14	0,12	94,63	99,63	308	21
4-CC-Barra-1m	8,85	20,00	110081	0,47	-1,03	-0,11	0,06	99,28	99,98	789	25
4-CC-Barra-2m	18,00	48,26	5784	1,03	-1,44	-0,15	0,21	87,40	96,58	729	198
C-DO-Barra-0_5m	8,63	19,82	110053	0,68	-0,66	0,10	0,04	99,62	99,99	423	9
C-DO-Barra-1m	17,49	47,94	5737	1,04	-0,80	0,17	0,13	90,81	99,29	527	41
C-CC-Barra-1m	8,67	19,82	110081	0,81	-0,85	0,09	0,06	98,09	99,91	2100	102
C-CC-Barra-2m	17,67	47,88	5784	1,37	-1,06	0,15	0,22	85,43	96,25	843	217

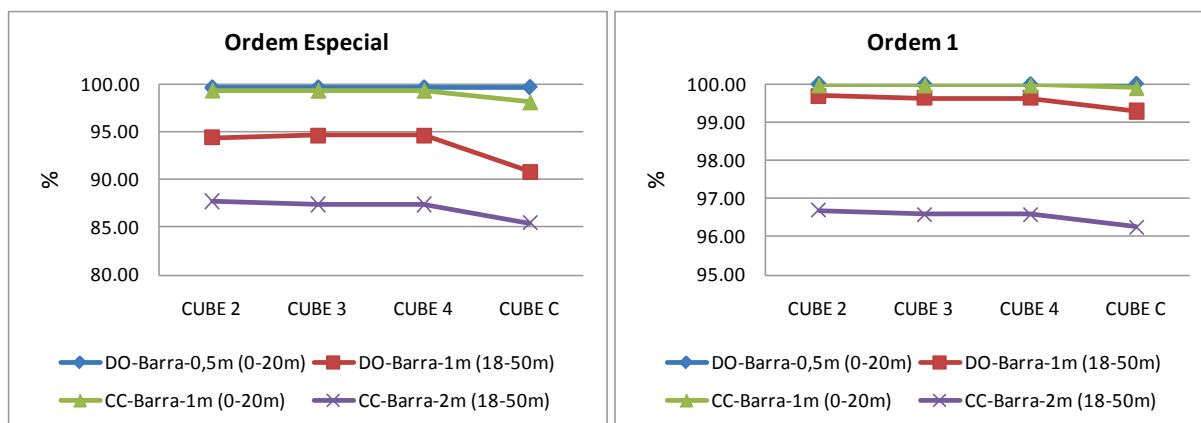


Figura 4.7 – Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível (Barra)

Da análise da Tabela 4.5 e da Figura 4.7 realçam-se os seguintes aspectos:

- As diferenças encontradas entre os diversos MB gerados e o PBF são praticamente constantes ao longo das fases de processamento, ou seja, o resultado do processamento efectuado nas fases 2 e 3 do fluxograma não é observável quando se analisam médias ou desvio-padrão das diferenças
- Os MBDO CUBE 4 são mais profundos que o PBF tradicional, em média, cerca de 9 e 14 cm para as resoluções de 0,5 e 1 m, respectivamente
- Os MBCC CUBE 4 são mais profundos que o PBF tradicional, em média, cerca de 11 e 15 cm para as resoluções de 1 e 2 m, respectivamente
- Os C-MBDO são menos profundos que o PBF tradicional, em média, cerca de 10 e 17 cm para as resoluções de 0,5 e 1 m, respectivamente

- Os C-MBCC são menos profundos que o PBF tradicional, em média, cerca de 9 e 15 cm para as resoluções de 1 e 2 m, respectivamente
- O desvio padrão é superior na área mais profunda e mais irregular, independentemente do MB utilizado na comparação
- Os MBDO apresentam os melhores resultados, sendo que, das comparações efectuadas, apenas os MB na área de maior profundidade não garante os 95% de diferenças inferiores à incerteza vertical admissível para LH de Ordem Especial, facto este que se deve ao elevado declive do talude existente na área exterior da Barra

A Tabela 4.6 ilustra os resultados obtidos da comparação das sondas constantes nas IG tradicionais com os MB gerados na Barra, ao longo das diversas fases de processamento. A Figura 4.8 ilustra as percentagens de comparações efectuadas cujas diferenças são inferiores à incerteza máxima admissível (Apêndice A), para LH de Ordem Especial e d Ordem 1a.

Tabela 4.6 – Comparação das sondas das IG com os MB (Barra)

	Z _{Min} (m)	Z _{Max} (m)	N.º Comparações	Max (m)	Min (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)	Falham O. Especial	Falham O. 1a
2-DO-Barra-0_5m	8,81	20,00	2315	0,13	-0,53	-0,11	0,04	99,61	99,96	9	1
2-DO-Barra-1m	18,00	48,40	101	0,08	-0,53	-0,18	0,10	93,07	100,00	7	0
2-CC-Barra-1m	8,84	20,00	2315	0,23	-0,55	-0,13	0,05	98,96	99,96	24	1
2-CC-Barra-2m	18,00	48,40	101	0,59	-1,10	-0,22	0,24	78,22	93,07	22	7
3-DO-Barra-0_5m	8,81	20,00	2315	0,14	-0,88	-0,11	0,05	99,53	99,96	11	1
3-DO-Barra-1m	18,00	48,31	101	0,11	-0,49	-0,17	0,10	95,05	100,00	5	0
3-CC-Barra-1m	8,85	20,00	2314	0,30	-0,57	-0,13	0,05	98,70	99,96	30	1
3-CC-Barra-2m	18,00	48,26	101	0,93	-1,23	-0,20	0,27	77,23	93,07	23	7
4-DO-Barra-0_5m	8,81	20,00	2315	0,14	-0,88	-0,11	0,05	99,53	99,96	11	1
4-DO-Barra-1m	18,00	48,31	101	0,11	-0,49	-0,17	0,10	95,05	100,00	5	0
4-CC-Barra-1m	8,85	20,00	2314	0,30	-0,57	-0,13	0,05	98,70	99,96	30	1
4-CC-Barra-2m	18,00	48,26	101	0,93	-1,23	-0,20	0,27	77,23	93,07	23	7
C-DO-Barra-0_5m	8,63	19,82	2315	0,37	-0,68	0,08	0,04	99,78	99,96	5	1
C-DO-Barra-1m	17,49	47,94	101	0,48	-0,04	0,14	0,11	93,07	100,00	7	0
C-CC-Barra-1m	8,67	19,82	2314	0,67	-0,26	0,06	0,05	99,48	99,91	12	2
C-CC-Barra-2m	17,67	47,88	101	1,18	-0,95	0,11	0,28	85,15	93,07	15	7

Da análise da Tabela 4.6 e da Figura 4.8 realçam-se os seguintes aspectos:

- A percentagem de comparações entre os diversos MB gerados e as sondas das IG com diferenças inferiores à incerteza admissível é inferior à obtida na Tabela 4.5, o que se justifica por agora se ter utilizado uma selecção de sondas mínimas numa malha superior à do PBF tradicional. As diferenças apenas não são significativas para os MBDO de maior resolução
- Mais uma vez, os piores resultados são encontrados no MB de menor resolução na zona de maior profundidade e de maior declive. Os resultados revelam ainda a importância de incrementar a resolução em fundos de elevada irregularidade
- As médias das diferenças são idênticas às comparações efectuadas na Tabela 4.5

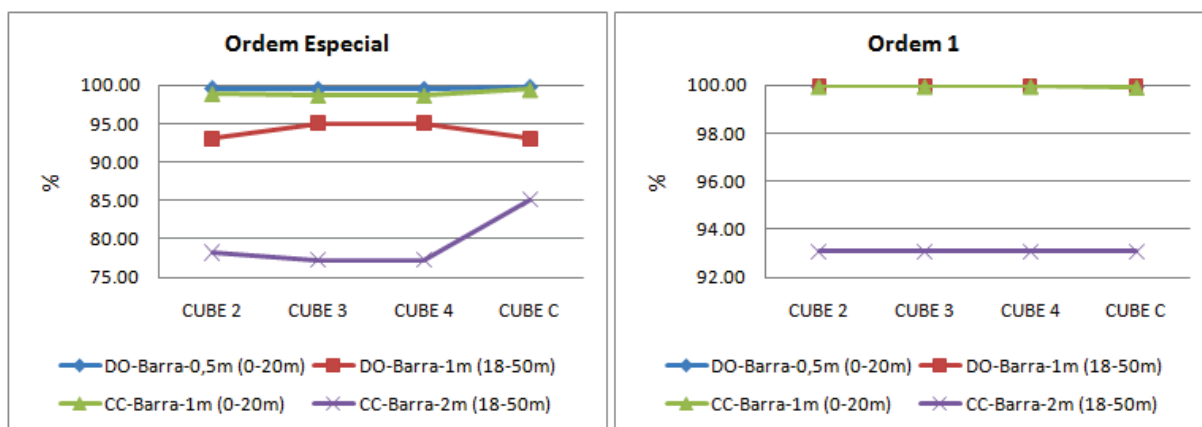


Figura 4.8 – Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível (MB vs IG)

4.3.2 Área Outao

As Tabelas 4.7 e 4.8 ilustram os resultados obtidos da comparação do PBF tradicional e das sondas das IG, respectivamente, com os MB gerados no Outao, ao longo das diversas fases de processamento. As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram as percentagens de comparações efectuadas cujas diferenças são inferiores à incerteza máxima admissível (Apêndice A), para LH de Ordem Especial e de Ordem 1a.

Os valores estatísticos obtidos são similares aos valores obtidos na Barra. Pontualmente, encontram-se algumas diferenças, nomeadamente, nos MB de maiores profundidades por a área correspondente ser de maior dimensão relativamente à da Barra. Na área do Outao foram efectuadas cerca de 210 mil comparações, enquanto na Barra foram efectuadas menos de 6 mil comparações (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Comparação do PBF tradicional com os MB (Outao)

	Z _{Min} (m)	Z _{Max} (m)	N.º Comparações	Max (m)	Min (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)	Falham O. Especial	Falham O. 1a
2-DO-Outao-0_5m	3,90	20,00	223224	0,38	-4,64	-0,09	0,06	99,25	99,97	1674	69
2-DO-Outao-1m	18,00	50,26	212313	1,42	-4,41	-0,11	0,09	98,69	99,90	2779	210
2-CC-Outao-1m	3,91	20,00	223068	1,42	-4,41	-0,10	0,07	98,56	99,89	3219	257
2-CC-Outao-2m	18,00	50,22	212756	1,85	-4,74	-0,12	0,15	94,64	98,95	11397	2230
3-DO-Outao-0_5m	3,90	20,00	223203	0,74	-2,10	-0,09	0,06	99,22	99,96	1748	80
3-DO-Outao-1m	18,00	50,26	212290	1,42	-2,37	-0,11	0,09	98,63	99,91	2902	200
3-CC-Outao-1m	3,91	20,00	223043	1,42	-1,90	-0,10	0,07	98,53	99,90	3270	225
3-CC-Outao-2m	18,00	50,22	212736	1,85	-2,62	-0,12	0,15	94,65	98,96	11381	2221
4-DO-Outao-0_5m	3,90	20,00	223203	0,74	-2,10	-0,09	0,06	99,22	99,96	1743	80
4-DO-Outao-1m	18,00	50,26	212290	1,42	-2,37	-0,11	0,09	98,63	99,91	2902	197
4-CC-Outao-1m	3,91	20,00	223043	1,42	-1,90	-0,10	0,07	98,54	99,90	3263	223
4-CC-Outao-2m	18,00	50,22	212736	1,85	-2,62	-0,12	0,15	94,65	98,96	11375	2215
C-DO-Outao-0_5m	3,74	19,72	223203	1,38	-1,66	0,11	0,05	99,36	99,97	1431	78
C-DO-Outao-1m	17,40	49,92	212290	1,79	-2,11	0,14	0,10	96,84	99,66	6704	718
C-CC-Outao-1m	3,75	19,82	223043	1,63	-1,73	0,10	0,08	97,27	99,80	6080	448
C-CC-Outao-2m	17,59	49,89	212736	2,31	-2,22	0,14	0,16	91,70	98,62	17661	2934

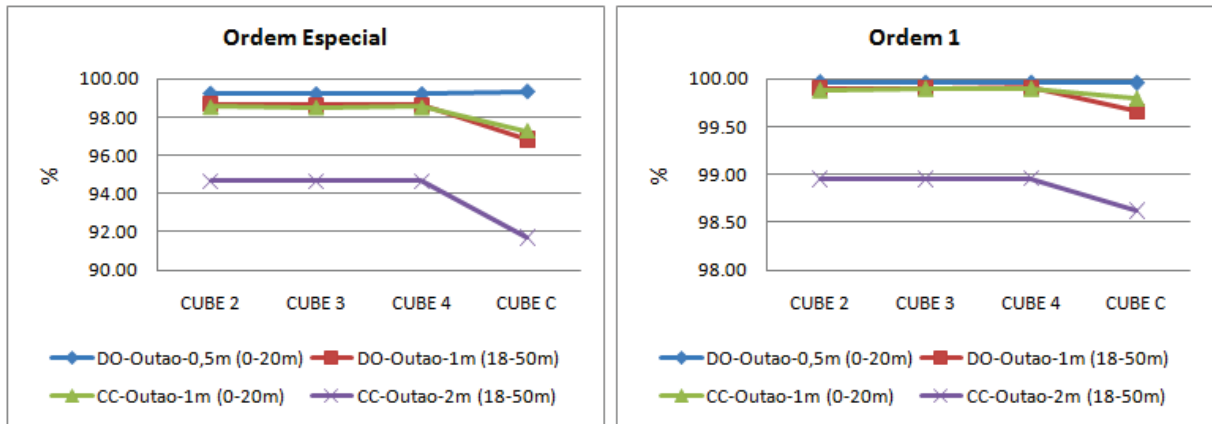


Figura 4.9 - Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível (Outao)

Tabela 4.8 – Comparação das sondas das IG com os MB (Outao)

	Z _{min} (m)	Z _{Max} (m)	N.º Comparações	Max (m)	Min (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)	Falham O. Especial	Falham O. 1a
2-DO-Outao-0_5m	3,9	20,0	4513	0,10	-1,60	-0,11	0,06	98,63	99,89	62	5
2-DO-Outao-1m	18,0	50,3	3841	0,39	-3,79	-0,13	0,11	97,81	99,87	84	5
2-CC-Outao-1m	3,9	20,0	4516	0,45	-1,92	-0,14	0,08	96,81	99,76	144	11
2-CC-Outao-2m	18,0	50,2	3856	0,65	-2,05	-0,17	0,15	90,92	98,19	350	70
3-DO-Outao-0_5m	3,9	20,0	4512	0,10	-1,81	-0,11	0,06	98,38	99,89	73	5
3-DO-Outao-1m	18,0	50,3	3841	0,39	-2,12	-0,13	0,10	97,50	99,84	96	6
3-CC-Outao-1m	3,9	20,0	4515	0,46	-1,46	-0,14	0,08	96,61	99,80	153	9
3-CC-Outao-2m	18,0	50,2	3856	0,68	-1,70	-0,17	0,15	91,03	98,21	346	69
4-DO-Outao-0_5m	3,9	20,0	4512	0,10	-1,81	-0,11	0,06	98,40	99,89	72	5
4-DO-Outao-1m	18,0	50,3	3841	0,39	-1,18	-0,13	0,09	97,53	99,87	95	5
4-CC-Outao-1m	3,9	20,0	4515	0,46	-1,46	-0,13	0,08	96,68	99,82	150	8
4-CC-Outao-2m	18,0	50,2	3856	0,68	-1,70	-0,17	0,15	91,05	98,24	345	68
C-DO-Outao-0_5m	3,7	19,7	4512	0,50	-1,49	0,09	0,06	99,69	99,98	14	1
C-DO-Outao-1m	17,4	49,9	3841	0,98	-1,65	0,11	0,10	98,36	99,74	63	10
C-CC-Outao-1m	3,8	19,8	4515	0,82	-1,12	0,07	0,07	99,29	99,87	32	6
C-CC-Outao-2m	17,6	49,9	3856	0,99	-1,46	0,09	0,14	95,44	99,33	176	26

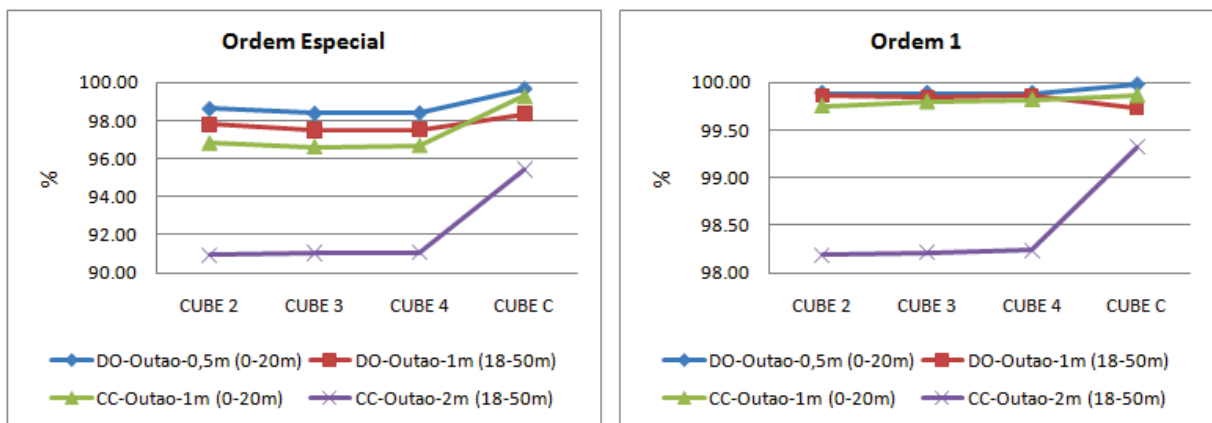


Figura 4.10 - Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível (MB vs IG)

4.3.3 Área Comercial

As Tabelas 4.9 e 4.10 e a Figura 4.11 ilustram os resultados obtidos da comparação dos PBF tradicionais com os MB gerados na área Comercial.

Tabela 4.9 – Comparação do PBF tradicional com os MB (Comercial)

	Z _{Min} (m)	Z _{Max} (m)	N.º Comparações	Max (m)	Min (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)	Falham O. Especial	Falham O. 1a
2-DO-Comercial-0_5m	-0,31	21,23	322819	0,23	-4,29	-0,09	0,04	99,75	99,99	823	39
2-CC-Comercial-1m	-0,13	21,13	322895	0,49	-4,33	-0,10	0,04	99,68	99,96	1027	129
3-DO-Comercial-0_5m	-0,31	21,18	322717	0,22	-4,30	-0,08	0,04	99,78	99,98	704	68
3-CC-Comercial-1m	-0,30	21,12	322801	0,37	-4,34	-0,09	0,04	99,68	99,96	1039	126
4-DO-Comercial-0_5m	-0,31	21,18	322717	0,22	-1,32	-0,08	0,04	99,78	99,98	697	65
4-CC-Comercial-1m	-0,30	21,12	322801	0,45	-1,85	-0,09	0,04	99,68	99,96	1023	119
C-DO-Comercial-0_5m	-0,46	21,01	322717	0,60	-4,13	0,09	0,04	99,92	99,99	268	23
C-CC-Comercial-1m	-0,45	20,94	322801	0,72	-4,15	0,08	0,04	99,72	99,98	917	71

Tabela 4.10 – Comparação das sondas das IG com os MB (Comercial)

	Z _{Min} (m)	Z _{Max} (m)	N.º Comparações	Max (m)	Min (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)	Falham O. Especial	Falham O. 1a
2-DO-Comercial-0_5m	-0,31	21,23	6082	0,10	-4,29	-0,10	0,07	98,92	99,85	66	9
2-CC-Comercial-1m	-0,13	21,13	6086	0,13	-4,33	-0,12	0,08	98,69	99,66	80	21
3-DO-Comercial-0_5m	-0,31	21,18	6080	0,10	-4,30	-0,10	0,07	99,03	99,84	59	10
3-CC-Comercial-1m	-0,30	21,12	6085	0,13	-4,34	-0,12	0,08	98,69	99,64	80	22
4-DO-Comercial-0_5m	-0,31	21,18	6080	0,10	-0,87	-0,10	0,05	99,10	99,87	55	8
4-CC-Comercial-1m	-0,30	21,12	6085	0,13	-1,55	-0,11	0,06	98,80	99,69	73	19
C-DO-Comercial-0_5m	-0,46	21,01	6080	0,33	-4,13	0,08	0,07	99,80	99,95	12	3
C-CC-Comercial-1m	-0,45	20,94	6085	0,46	-4,15	0,06	0,08	99,56	99,85	27	9

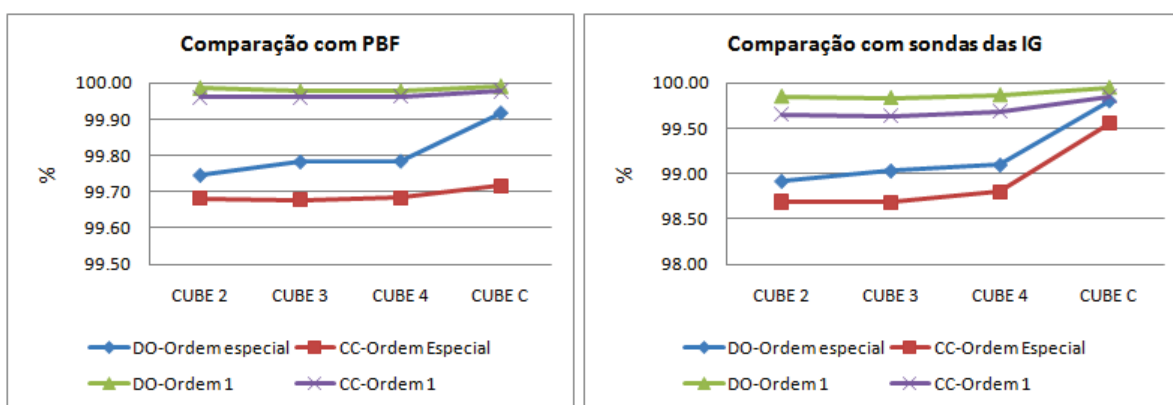


Figura 4.11 - Percentagem de diferenças inferiores à incerteza máxima admissível

A área Comercial tem um fundo mais regular e possui apenas um intervalo de profundidade, destacando-se a homogeneidade das comparações efectuadas:

- Os MB CUBE 4 são mais profundos que o PBF tradicional, em média, cerca de 8 e 9 cm para as resoluções de 0,5 e 1 m, respectivamente
- Os C-MB são menos profundos que o PBF tradicional, em média, cerca de 10 e 17 cm para as resoluções de 0,5 e 1 m, respectivamente
- OS MB CUBE 2, CUBE 3 e Conservativos (C-DO e C-CC) apresentam valores de diferença significativos, assinalados nas Tabelas 4.9 e 4.10 a cor vermelha. Estes valores localizam-se sobre as estruturas portuárias de face vertical, estruturas de difícil modelação e justificam a designação de sondas e os valores normais apresentados pelos MB CUBE 4

4.3.4 Comparação das IG dos MB finais com as IG tradicionais

As Figuras 4.12 a 4.15 ilustram uma área do LH de Setúbal no acesso à Doca de Recreio com a informação da IG do PBF tradicional extraída da IG designada 26308C1/11S (Instituto Hidrográfico, 2011) desenhada a preto. Nas Figuras, a roxo está desenhada a informação da IG elaborada a partir dos MB MBDO, MBCC, C-MBDO e C-MBCC, respectivamente. As sondas e profundidades representadas correspondem às mínimas seleccionadas pelo algoritmo de supressão (CARIS, 2011b) com uma distância mínima de 20 m no terreno. Face ao efeito da supressão de dados deve-se ter algum cuidado na interpretação do desenho e contornos das isóbatas, no entanto, podem retirar-se as seguintes ilações:

- O desenho das isóbatas das IG dos MBDO e MBCC está ligeiramente deslocado no sentido da maior profundidade relativamente às isóbatas do PBF tradicional
- O desenho das isóbatas das IG dos C-MBDO e C-MBCC está ligeiramente deslocado no sentido da menor profundidade relativamente às isóbatas do PBF tradicional, ou seja, permitem uma maior segurança à navegação
- Por conterem as sondas designadas, as IG dos MBDO e MBCC são muito similares
- As IG dos C-MBDO e C-MBCC não contêm as sondas designadas, pelo que é visível, nas Figuras 4.14 e 4.15 a amarelo, uma sonda de 4,7 m (sonda 11 no Apêndice D) correspondente a uma estrutura portuária que não foi assimilada por qualquer dos MB

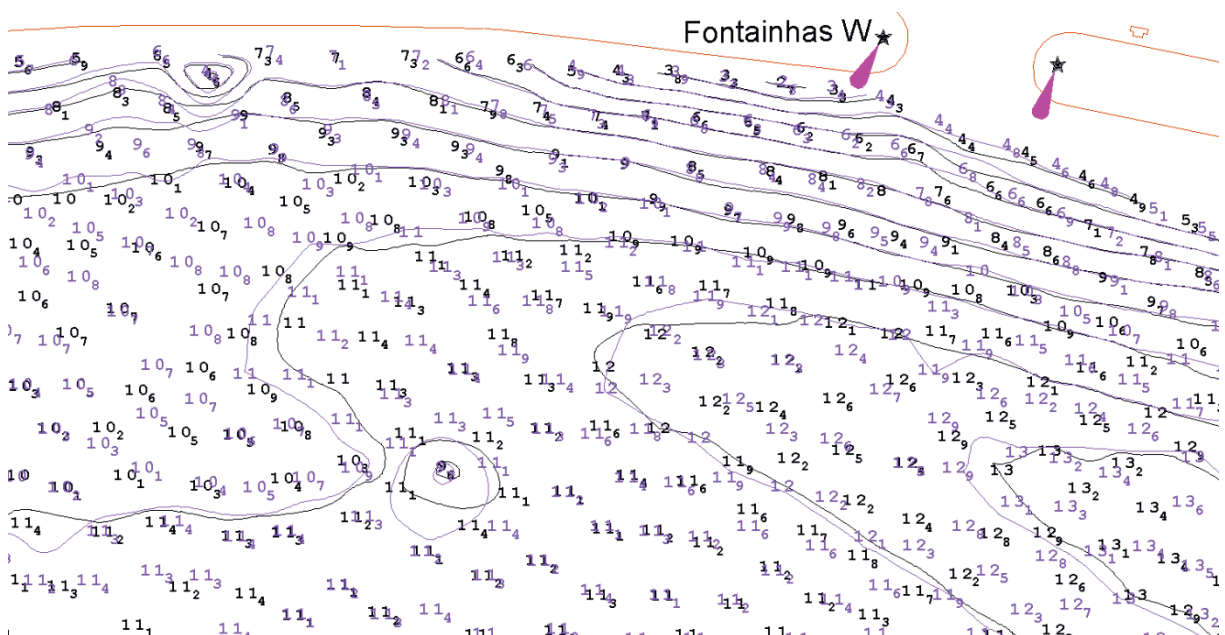


Figura 4.12 - Comparação entre a IG do PBF tradicional e a IG do MBDO

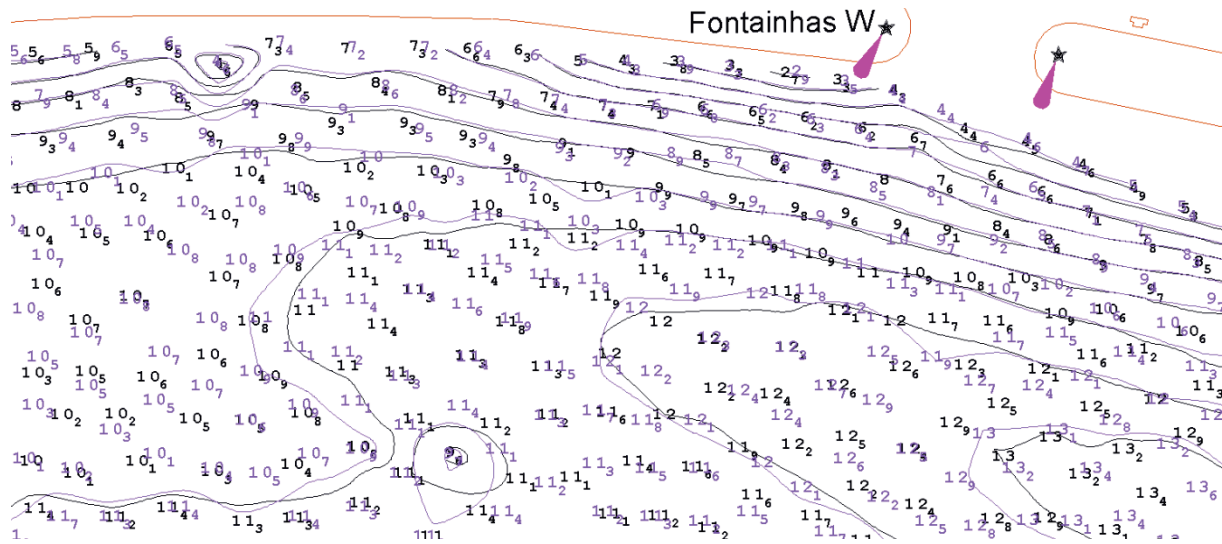


Figura 4.13 - Comparação entre a IG do PBF tradicional e a IG do MBCC

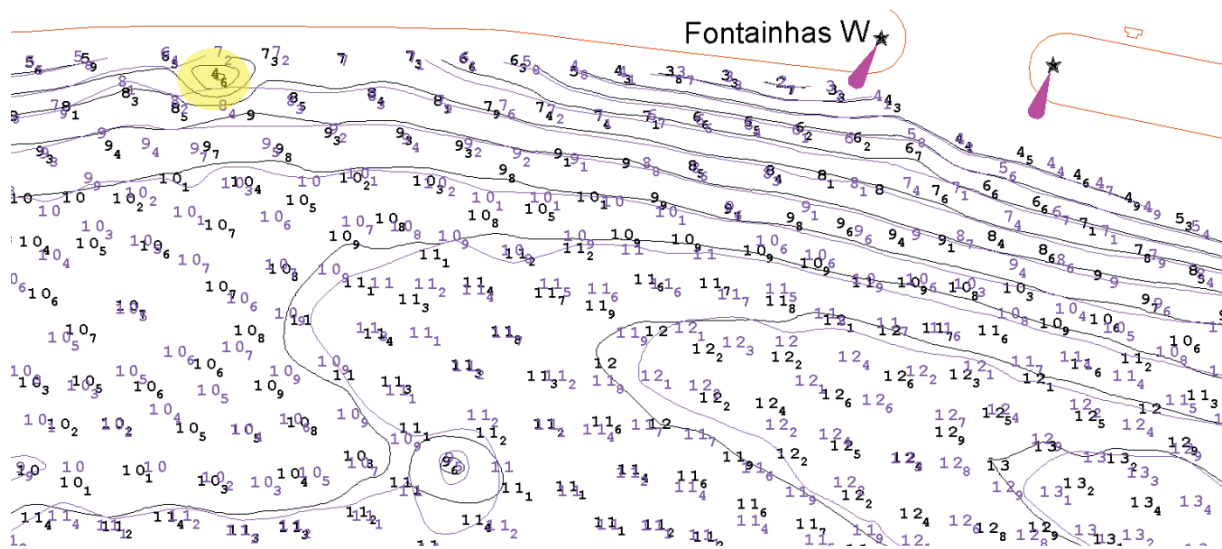


Figura 4.14 - Comparação entre a IG do PBF tradicional e a IG do C-MBDO

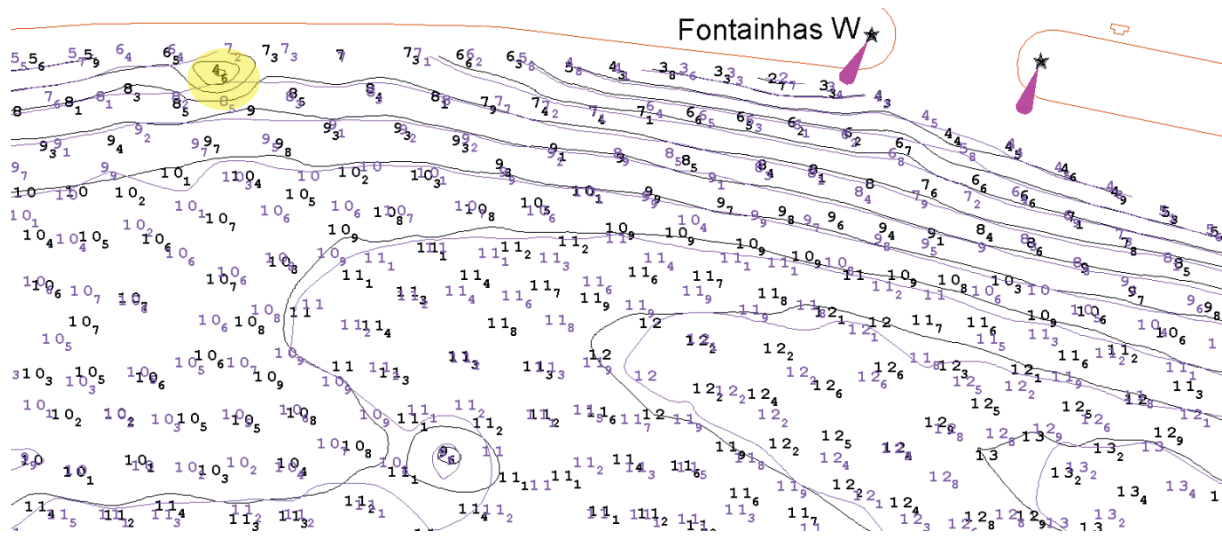


Figura 4.15 - Comparação entre a IG do PBF tradicional e a IG do C-MBCC

4.3.5 Objectos e estruturas relevantes para a navegação

No LH de Setúbal foram detectados diversos objectos e estruturas, com formas e dimensões bastante diversificadas. De modo a não tornar exaustiva a descrição dos resultados obtidos da MB dos objectos detectados, foram seleccionados alguns exemplos de objectos, estruturas ou conjuntos de objectos representativos de situações típicas.

4.3.5.1 Área Barra

Na área da Barra apenas um objecto foi detectado (Figura 4.16). Entre a profundidade estimada pelos MBDO e MBCC e a sonda designada (sonda mínima) registaram-se, respectivamente, diferenças não relevantes de 5 e 10 cm. Este objecto tem cerca de 20 cm de altura e cerca de 2 m de largura e de comprimento. A fiada de sondagem foi executada próximo da vertical do objecto.



Figura 4.16 - Objecto detectado na área da Barra

4.3.5.2 Área Outao

A Tabela 4.11 traduz o resultado da comparação das sondas designadas com os MB gerados na área Outao. As sondas designadas nesta área correspondem a estruturas de dimensões maiores que as estruturas cúbicas de 1 e 2 m de aresta especificadas nos requisitos mínimos da OHI. Os resultados menos bons obtidos na comparação advêm do facto de, a maioria dos objectos detectados se localizarem na zona adjacente ao maior declive registado entre o Outão e o Albarquel. Deve ainda considerar-se que a menor densidade de sondas adquiridas nesta zona (LH de Ordem 1b) dificulta uma modelação mais consistente. Os MB conservativos têm resultados significativamente melhores que os MB CUBE 3. Os objectos detectados na área mais regular, quando alcançada uma densidade de sondas consistente com a da solução CUBE, foram adequadamente representados nos MB, mais concretamente no MBDO.

Tabela 4.11 – Comparação das sondas designadas com os MB (Outao)

	Z _{Min} (m)	Z _{Max} (m)	N.º Comparações	Max (m)	Min (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)	Falham O. Especial	Falham O. 1a
3-DO-Outao-0_5m	3,9	20,0	30	0,00	-0,52	-0,18	0,13	76,67	100,00	7	0
3-DO-Outao-1m	18,0	50,3	16	0,07	-1,91	-0,43	0,51	68,75	81,25	5	3
3-CC-Outao-1m	3,9	20,0	29	0,00	-1,51	-0,33	0,28	55,17	86,21	13	4
3-CC-Outao-2m	18,0	50,2	17	0,00	-1,68	-0,65	0,44	35,29	58,82	11	7
C-DO-Outao-0_5m	3,7	19,7	30	0,34	-0,19	0,09	0,09	96,67	100,00	1	0
C-DO-Outao-1m	17,4	49,9	16	0,27	-1,44	-0,12	0,45	81,25	81,25	3	3
C-CC-Outao-1m	3,8	19,8	29	0,13	-1,12	-0,09	0,26	82,76	96,55	5	1
C-CC-Outao-2m	17,6	49,9	17	0,25	1,45	-0,37	0,46	58,82	64,71	7	6

4.3.5.3 Área Comercial

A Tabela 4.12 apresenta os resultados da comparação das sondas designadas com os MB gerados na área Comercial. Nesta tabela, os valores máximos de diferenças negativas mostram a necessidade de designar sondas sobre estruturas relevantes para a navegação, principalmente, as de menor dimensão e com arestas quase verticais. Este tipo de objectos, existente em grande número nesta área, só foi adequadamente representado nos MB nos casos em que a cobertura do fundo foi de 200%.

Tabela 4.12 – Comparação das sondas designadas com os MB (Comercial)

	Z _{Min} (m)	Z _{Max} (m)	N.º Comparações	Max (m)	Min (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)	Falham O. Especial	Falham O. 1a
3-DO-Comercial-0_5m	-0,31	21,18	93	0,00	-4,30	-0,25	0,48	77,42	90,32	21	9
3-CC-Comercial-1m	-0,30	21,12	93	0,00	-4,34	-0,35	0,52	66,67	83,87	31	15
C-DO-Comercial-0_5m	-0,46	21,01	93	0,40	-4,13	-0,01	0,47	92,47	94,62	7	5
C-CC-Comercial-1m	-0,45	20,94	93	0,20	-4,15	-0,12	0,51	86,02	91,40	13	8

A Figura 4.17 ilustra três objectos cúbicos com cerca de 1 m de aresta. Todas as profundidades estimadas ilustradas são do MBDO. Na imagem A o objecto foi detectado apenas com os feixes centrais de uma única fiada, registando-se cerca de 30 cm de diferença entre a profundidade estimada e a sonda mínima. Na imagem B o objecto foi detectado com os feixes mais exteriores de duas fiadas, registando-se cerca de 40 cm de diferença entre a profundidade estimada e a sonda mínima. Na imagem C o objecto foi detectado com os feixes centrais de uma fiada e com feixes exteriores de outra fiada, registando-se uma diferença inferior a 10 cm entre a profundidade estimada e a sonda mínima. Estes resultados indicam que para a modelação batimétrica representar na superfície um objecto de dimensão reduzida deve ser garantida uma sobreposição entre faixas sondadas de 50% (200% de cobertura).

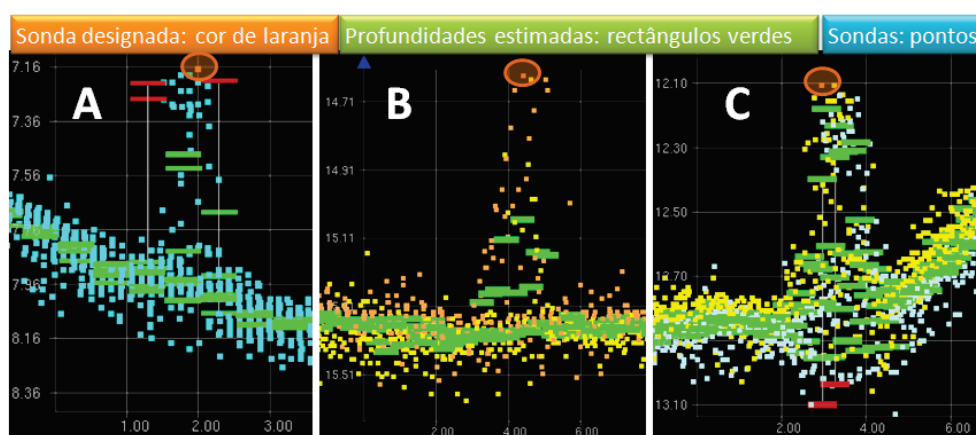


Figura 4.17 - Objectos cúbicos com cerca de 1 m de aresta

O maior problema na modelação de estruturas de dimensão reduzida ocorre quando estas têm arestas verticais ou, quando a busca total não foi garantida. A Figura 4.18 ilustra três estruturas relevantes para a navegação. As profundidades estimadas ilustradas na figura são do MBDO. Nas imagens A e B são visíveis partes de dois pilares de amarração de um cais flutuante. A verticalidade da estrutura não permite uma modelação adequada, obrigando à designação de sondas. De realçar

que apesar de estas duas estruturas se desenvolverem até à superfície, na aquisição de dados apenas foi detectada a sua base. A imagem C ilustra uma falha de informação na aquisição de dados.

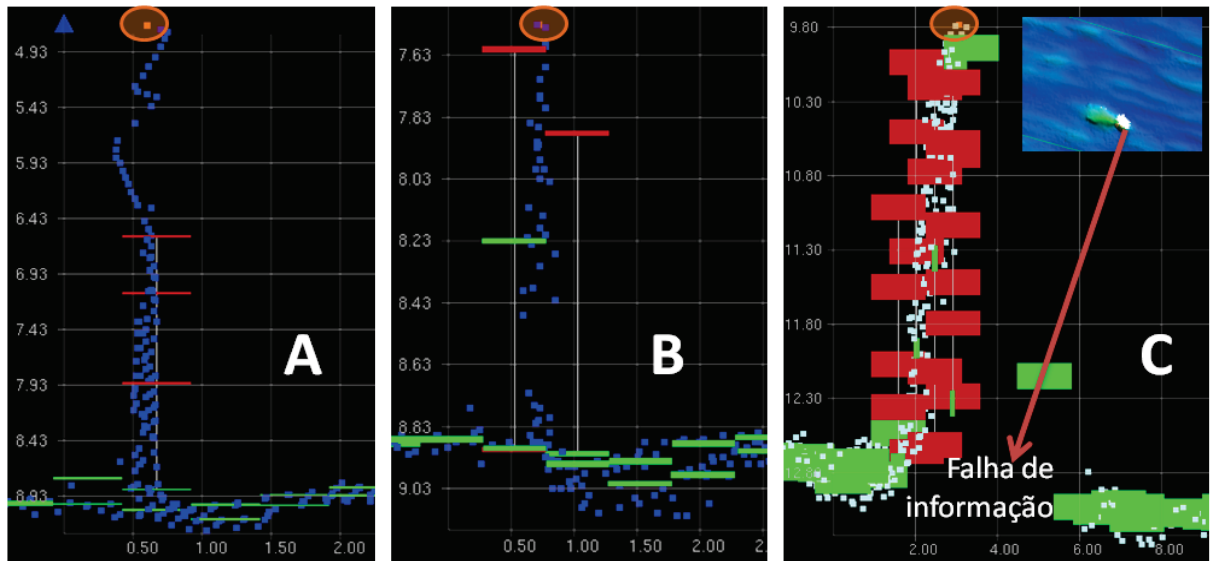


Figura 4.18 - Falhas na modelação

A Figura 4.19 ilustra uma estrutura rochosa (obstrução) e o melhor comportamento do MBDO relativamente ao MBCC. A estrutura rochosa tem cerca de 20 m de largura. Possui duas saliências com cerca de 4 m de largura cada, que se desenvolvem verticalmente ilustradas a cor roxa na imagem central. A profundidade circundante à estrutura rochosa varia entre os 6 e os 8 m. Perante uma sonda designada de 4,496 m (sonda mínima truncada a 4,4 m na figura), a profundidade estimada pelo MBDO é de 4,601 m enquanto a profundidade estimada pelo MBCC é de 4,672 m.

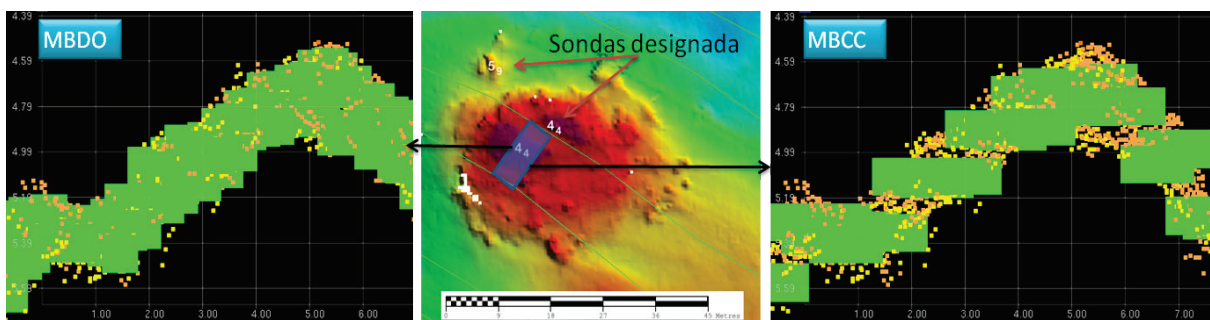


Figura 4.19 - Estrutura rochosa com cerca de 20 m de largura

4.4 Avaliação das potencialidades do CUBE

Em regra, tal como observável nas Tabelas 4.5 a 4.10 (valores a negrito) pode confirmar-se o bom comportamento do CUBE no processamento de dados batimétricos e, conseqüentemente, na sua modelação, constatando-se que a média das diferenças encontradas entre as superfícies geradas com o algoritmo proposto e os PBF tradicionais dos LH são inferiores a metade do valor da incerteza vertical das sondas. Numa abordagem mais conservativa, e subtraindo às profundidades estimadas a incerteza da estimação nodal, verifica-se que os MB são menos profundos que os PBF tradicionais num valor inferior, igualmente, a cerca de metade da incerteza vertical das sondas. Da análise dos resultados obtidos, incluindo os Apêndices C e D, podem retirar-se ainda as seguintes conclusões:

- Incapacidade do CUBE de efectuar uma estimação adequada na presença de dados afectados por más parametrizações do sondador ou por uma utilização deficiente dos sensores (ex: sensor de movimentos não estabilizado), o que está de acordo com os axiomas do CUBE (Calder e Wells, 2007) relativamente aos erros grosseiros e sistemáticos
- Em regra, o algoritmo modela adequadamente os ecos falsos provenientes da coluna de água, de lóbulos secundários ou de multitrajecto, excepto se a densidade dessas sondas for superior às sondas circundantes não anómalas
- Em zonas de fundos regulares, o algoritmo efectua uma modelação adequada das sondas que se encontram na zona de transição da detecção em amplitude para a detecção em fase, as quais são mais propensas a identificarem-se como ruído, com excepções pontuais nos MB de maior resolução nos nodos com uma menor densidade de sondas
- Nas zonas de fronteira ou na presença de falhas de cobertura, quando a densidade de sondas é muito reduzida, podem ocorrer estimações incorrectas, o que denota a importância da análise efectuada por Rice e Calder (2009) referida na secção 2.6.1
- Na presença de fundos extremamente irregulares ou na presença de objectos, obstruções ou estruturas relevantes para a navegação é obrigatória uma análise cuidada das profundidades estimadas e a designação de sondas quando não cumpridos os requisitos de designação de sondas (secção 2.6.2.1)
- Iguamente, nas zonas de fronteira dos MB ou nas zonas onde a busca total do fundo não foi garantida nos LH, como por exemplo, nos LH de Ordem 2, é necessária uma análise mais cuidada face à menor densidade de sondas por nodo. Por vezes, pode acontecer existir apenas uma sonda no raio de captura de um nodo, o que faz dela a profundidade estimada, independentemente do seu valor ou consistência com os nodos vizinhos
- Estatisticamente, na Selvagem Grande foi encontrado um número elevado de casos em que a diferença entre os MB e o PBF de 2009 é superior à incerteza máxima admissível para a Ordem do LH. No entanto, verificou-se que estas diferenças se encontravam em zonas de talude acentuado adjacentes a estruturas rochosas, não colocando em causa a Segurança da Navegação e que resultaram do conservadorismo do hidrógrafo. Estas situações são inerentes à subjectividade do processamento tradicional e à difícil apreciação por parte do hidrógrafo quando recorre, unicamente, às ferramentas de edição e visualização 2D e 3D para a validação das sondas
- Os MBCC representam o fundo marinho de forma adequada quando este apresenta contornos regulares
- Tal como referido pela NOAA (2010b), na presença de objectos ou fundos de natureza rochosa extremamente irregulares, torna-se necessária a geração de MBDO de modo a minimizar as diferenças entre as sondas mínimas e as profundidades estimadas
- Utilizando a limpeza automática, com recurso ao *Surface Filter* no caso do HIPS, os MB tornam-se mais consistentes, dado que os valores dos desvios padrão são menores, com um menor número de hipóteses de solução e com uma maior confiança nas profundidades estimadas

O processamento tradicional do LH de Setúbal demorou 18 dias (Tabela 3.1), dos quais cerca de 5 dias foram gastos no controlo de qualidade, 10 dias na validação dos dados e 3 dias na elaboração dos produtos finais. No processamento efectuado utilizando o fluxograma da Figura 3.7, o primeiro (controlo de qualidade) e o último (elaboração dos produtos finais) processo têm uma duração idêntica. A grande diferença na duração do processamento ocorre no processo intermédio (validação dos MB). Neste processo, considerando apenas um determinado tipo de cobertura predefinido -

MBCC ou MBDO, foram gastos 2 dias e meio enquanto no processamento tradicional foram gastos 10 dias. Ao todo, o processamento completo com recurso ao CUBE demorou 10,5 dias.

Assim, o processamento dos dados com recurso ao CUBE foi mais rápido que o processamento tradicional, realçando-se que o tempo gasto na validação dos MB de Setúbal correspondeu a 25% do tempo gasto na validação tradicional das sondas.

As camadas de informação Número de Hipóteses e Confiança nas Hipóteses possuem informação muito valiosa, no entanto não é possível estabelecer um critério genérico que estabeleça a necessidade, por parte do hidrógrafo, de investigar a informação nodal. Por exemplo, um valor de Confiança nas Hipóteses igual a 2 ou 1 significa que 75% ou 80% das sondas dentro do raio de captura nodal contribuíram para a estimação da profundidade, respectivamente. Todavia, este valor tem que ser relacionado com a resolução da superfície (consequentemente, com a profundidade média) e com a irregularidade do fundo. Neste último caso, vejamos o exemplo ilustrado na Figura 4.20. Uma sonda, apesar da sua coerência com o perfil do fundo marinho, é estatisticamente incompatível com as duas profundidades nodais estimadas. Nesta situação, a solução possível do CUBE é aumentar a resolução do MB ou aumentar o parâmetro *estimated offset value* (h).

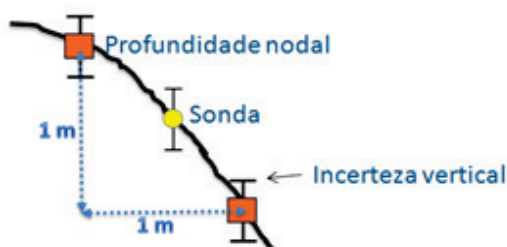


Figura 4.20 - Irregularidade do fundo vs resolução do MB

Do estudo efectuado é possível enumerar alguns critérios de investigação (Tabela 4.13), ou seja, identificar nas camadas de informação de um MB gerado pelo CUBE valores que requerem uma análise mais específica através da visualização 2D e 3D.

Tabela 4.13 – Critérios para investigação

Camada de informação	Critérios de investigação
<i>Density</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Nodos com menos de 13 sondas – Nodos representativos de objectos e/ou estruturas relevantes – As zonas de fronteira devem ser todas investigadas
<i>Depth</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Identificação de objectos e/ou estruturas relevantes, texturas anómalas ou padrões, amostras de ruído – Utilizar uma exageração vertical superior a 3 e variar a iluminação solar, visualizando, pelo menos, 2 quadrantes diferentes (ex: noroeste e nordeste)
<i>Hypothesis Count</i>	– Depende da irregularidade do fundo/resolução
<i>Hypothesis Strength</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Depende da irregularidade do fundo/resolução – Um valor superior a 2 deve ser analisado, nomeadamente, na presença de fundos regulares
<i>Standard Deviation</i>	<ul style="list-style-type: none"> – MBDO: investigar nodos com um valor de desvio padrão maior que metade da incerteza vertical admissível para o LH – MBCC: investigar nodos com um valor de desvio padrão maior que a incerteza vertical admissível para o LH
<i>Node Standard Deviation</i>	– Útil para a eliminação de valores anómalos com reflexos na diminuição de hipóteses alternativas.
<i>Uncertainty</i>	– Investigar nodos com valor maior que a incerteza vertical admissível para o LH

4.4.1 Cartografia Náutica

O resultado prático do processamento tradicional é um subconjunto de sondas validadas de uma forma conservadora (sondas mínimas), de modo a garantir uma maior segurança da navegação, enquanto a modelação de dados pelo CUBE representa mais fidedignamente o relevo marinho. Obtidos os resultados da comparação entre os diversos MB gerados no processamento de dados e o PBF tradicional importa perceber quais as situações em os valores de diferença são superiores às incertezas máximas admissíveis definidas pela OHI para as diferentes Ordens dos LH.

De realçar, antes de mais, que a comparação envolve, por um lado, MB cujas profundidades são colocadas nas posições dos nodos definidas por convenção e, por outro lado, que o PBF tradicional é um subconjunto de sondas observadas às quais estão associadas incertezas horizontais e verticais. No LH realizado em Setúbal foram validadas cerca de 375 milhões de sondas (Tabela 3.1). Por dificuldades de processamento e por muitas sondas possuírem valores idênticos, no processo de geração de produtos cartográficos não é adequado trabalhar um número tão elevado de sondas. Assim, naquele LH foi efectuada uma supressão de sondas sendo seleccionada para o PBF tradicional a sonda mínima em cada célula de $2m^2$, num total de 839685 sondas. A profundidade estimada pela CUBE foi comparada com a sonda mínima das sondas validadas e existentes em cada nodo. Assim, dependendo da resolução de um MB e da orografia do fundo marinho, as comparações efectuadas podem apresentar valores superiores à máxima incerteza admissível. Exemplificando, na entrada da barra de Setúbal, zona caracterizada por um declive acentuado, observa-se que apesar de existirem diferenças entre os MB e o PBF tradicional superiores à máxima incerteza admissível as profundidades estimadas pelo CUBE podem ser utilizadas na cartografia náutica. As diferenças referidas são, maioritariamente, provenientes das situações ilustradas na Figura 4.21. A sonda representada a amarelo, quando comparada com o nodo 2 possui uma diferença superior à máxima incerteza admissível para LH de Ordem Especial (0,29 m para uma profundidade de 20 m). A juntar a esta situação, as incertezas horizontais e verticais das sondas observadas podem, igualmente, comprometer qualquer tipo de comparação em zonas de talude acentuado, como o caso em que, face à dificuldade do processamento tradicional, a sonda representada a azul foi mantida como válida, originando uma diferença vertical comparativamente com o nodo 2, igualmente, superior à máxima incerteza admissível.

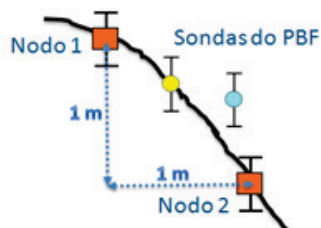


Figura 4.21 - Comparações inadequadas entre os PBF tradicionais e os MB

Quer os MBDO quer os MBCC elaborados no processamento de dados são mais profundos que o PBF tradicional em cerca de 10 cm. A excepção é a entrada da barra de Setúbal, zona de pequena dimensão caracterizada por maiores profundidades e de elevada variação da profundidade, onde a média das diferenças atinge cerca de 20 cm.

Na Figura 4.22 é possível observar a elevada conformidade dos MB com o PBF tradicional na zona da Barra imediatamente a seguir ao talude de entrada. A figura ilustra os MB gerados na zona da Barra com indicação das diferenças dos MB com o PBF tradicional. Analisando os MB conservativos, ou seja, fruto da subtracção da incerteza final do MB à profundidade estimada, as médias das diferenças são idênticas mas, agora, de sentido contrário significando uma menor profundidade dos MB relativamente ao PBF tradicional. De modo a tornar as imagens mais legíveis, na Figura 4.22 apenas

estão representadas as diferenças negativas mais significativas, ou seja, aquelas que mais afectam a segurança da navegação. As diferenças positivas foram ocultadas no caso em que existam diferenças negativas nas proximidades. A Figura 4.23 ilustra uma zona caracterizada pela existência de uma duna. As diferenças mais significativas são encontradas sobre o talude da duna e no MBCC.

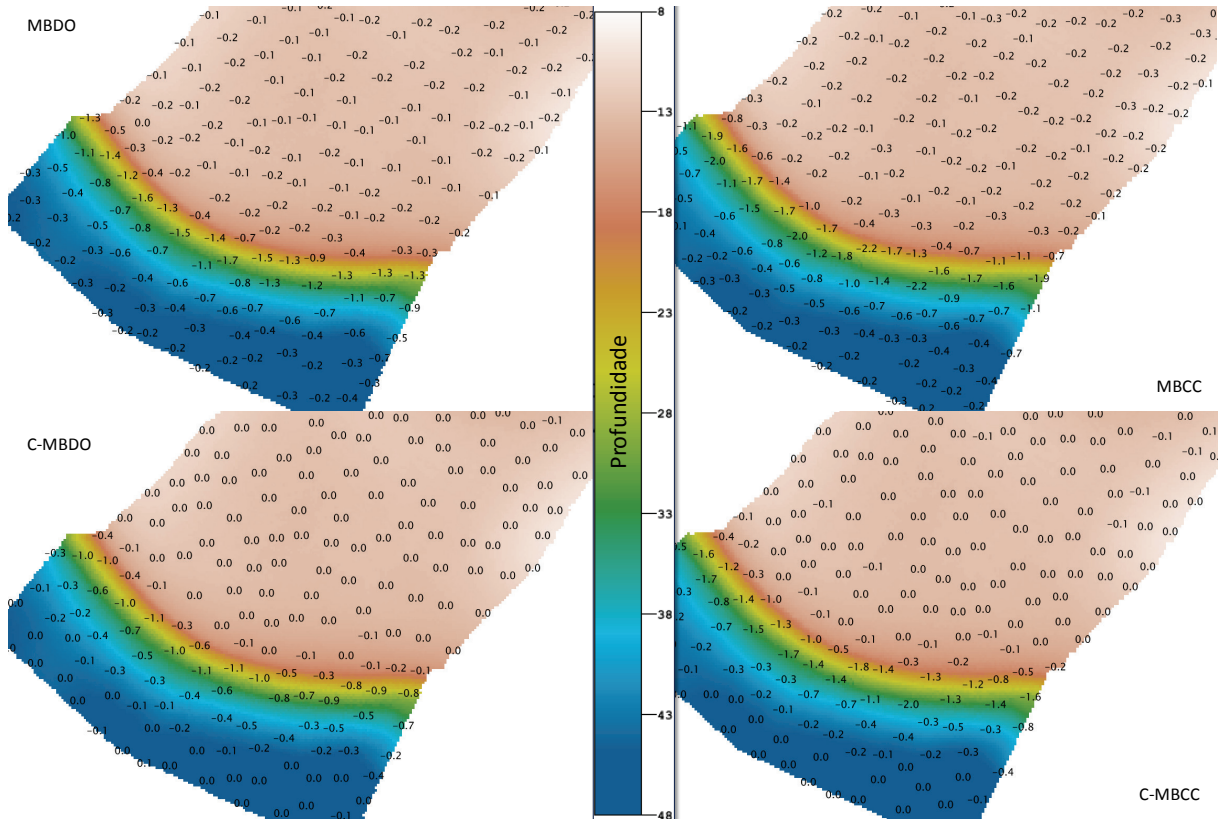


Figura 4.22 - Diferenças (m) negativas mais significativas entre o PBF tradicional e os MB da barra

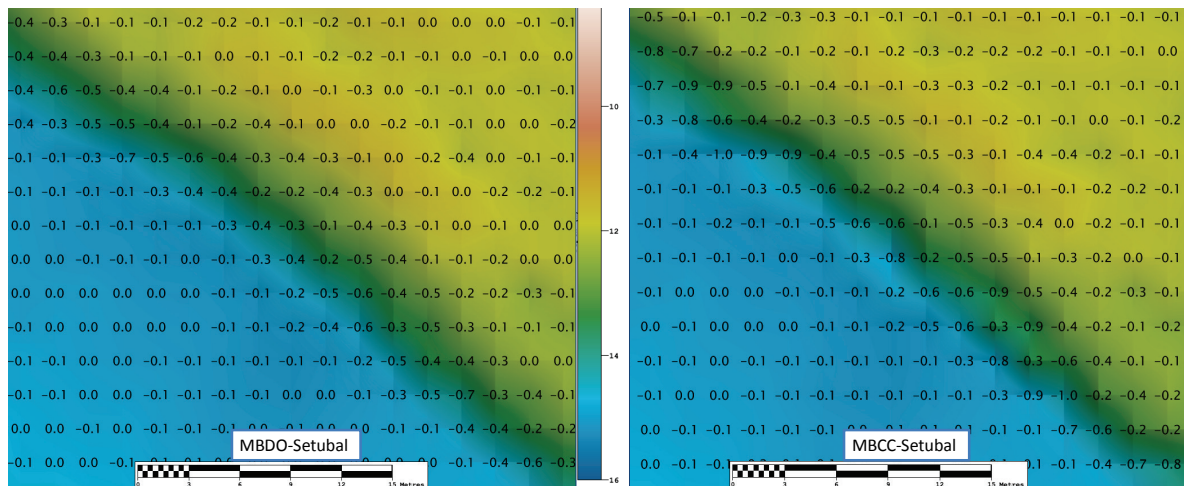


Figura 4.23 - Diferenças (m) entre o PBF tradicional e os MB sobre uma duna na área da Barra

A Figura 4.24 ilustra as diferenças entre os MB e o PBF tradicional sobre uma estrutura rochosa com cerca de 20 m de comprimento por 15 m de largura e 4 m de altura, existente na área Comercial. As maiores diferenças ocorrem no talude da estrutura. Sobre o topo da estrutura não são encontradas diferenças significativas. As imagens ilustram ainda a sonda designada, desenhada a branco.

Identificadas as diferenças mais significativas entre o PBF tradicional e os MB gerados, conclui-se que o conjunto das profundidades estimadas pelo CUBE e das sondas designadas garantem os requisitos de segurança da navegação e pode ser utilizado na cartografia náutica. O Apêndice D mostra as diferenças entre as sondas relevantes discriminadas em Instituto Hidrográfico (2011) e as profundidades estimadas pelos modelos batimétricos gerados.

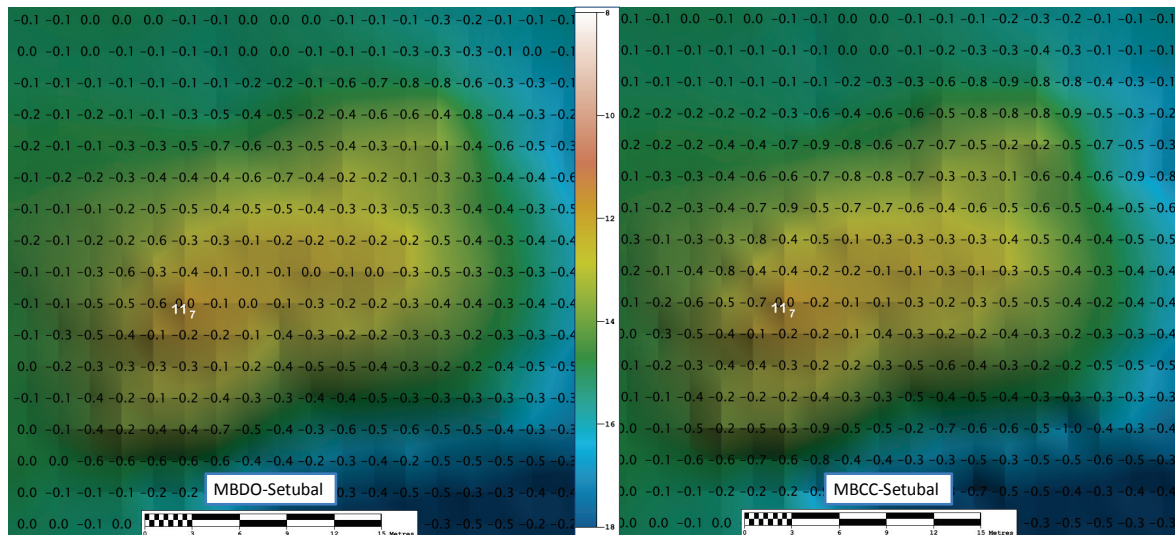


Figura 4.24 - Diferenças (m) entre o PBF tradicional e os MB (estrutura rochosa)

4.4.2 Cálculo de volumes e outras aplicações

Um dos aspectos mais relevantes da modelação batimétrica efectuada, analisando as Figuras 4.7 a 4.11, é a homogeneidade das comparações dos MB CUBE 2, CUBE 3 e CUBE 4 com o PBF tradicional. Efectuado o cálculo do volume de dragados, nas condições e para a informação descrita na secção 3.3 obtiveram-se os resultados expressos na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Volumes calculados (m³) para as superfícies CUBE (inicial e validada) e PBF

		Sup. Inicial - CUBE 2	Sup. Validada - CUBE 3	PBF do LH
Resolução espacial	3 m	316456	316238	291424
	2 m	314990	314937	298544
	1 m	314165	314255	305044
	0,5 m	314144	314283	307972

Da comparação dos volumes calculados entre superfícies CUBE, inicial e validada, concluiu-se que, qualquer que seja a resolução espacial considerada, não se verifica diferença significativa entre volumes, situação ilustrada na Figura 4.25. Este resultado revela-se de grande importância já que possibilita que o cálculo do volume de dragados seja feito praticamente após a aquisição dos dados, obrigando apenas à eliminação dos erros grosseiros e ao necessário controlo de qualidade. A Tabela 4.14 expressa igualmente que, com o aumento da resolução do fundo, os volumes CUBE decrescem e os volumes resultantes do PBF crescem, não apresentando a mesma taxa de variação, tal como ilustrado na Figura 4.26. Os LH que cumpram os requisitos de Ordem Especial referidos em OHI (2008), apresentam incertezas verticais máximas de 25 cm (0 m de profundidade) a 39 cm (40 m). A estes valores correspondem incertezas no volume de 10% a 1,95 %, respectivamente (Veiga *et al.*, 2010). Nas condições da área de estudo aqui considerada, para uma profundidade de 10 m, tem-se

uma incerteza vertical de 26 cm e uma incerteza máxima do volume de 5,2%. Os volumes calculados com a superfície CUBE diferem dos calculados com o PBF em 8% a 2%. Estes valores correspondem a um acréscimo na profundidade da superfície CUBE de 8 cm a 2 cm.

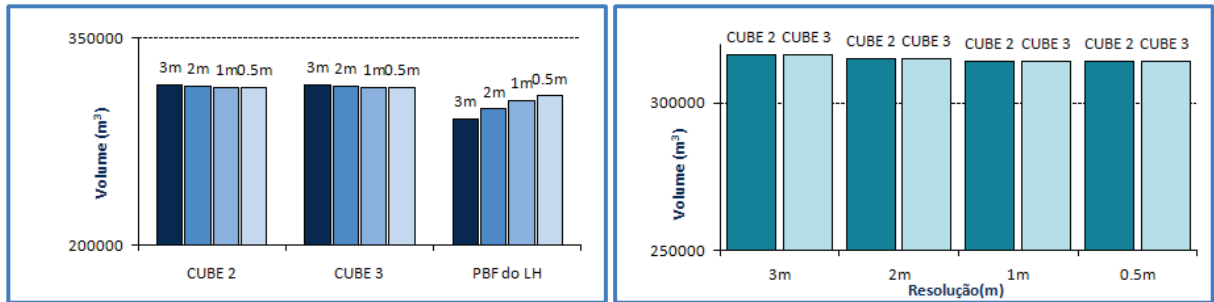


Figura 4.25 - Volumes dragados

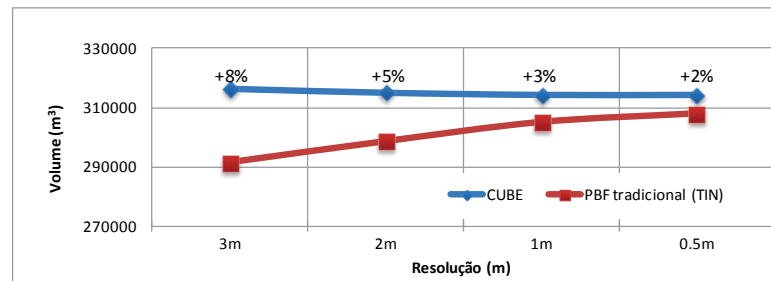


Figura 4.26 - Variação do volume calculado com a resolução espacial

A tomada de decisão na escolha da superfície, CUBE ou resultante do PBF, não é o único factor de incerteza no volume. A Figura 4.27 ilustra as diferenças na estimação de profundidades entre o MBDO e o MBCC no LH de Setúbal. A figura corresponde a uma faixa sondada numa área dragada localizada a jusante do cais Comercial, sendo visíveis os vales deixados pela aspiração de sedimentos. Comparando os dois MB, verifica-se que o MBCC efectua a atenuação dos máximos registados (profundidade mínima e profundidade máxima), o que na prática, tal como observado na Figura 4.25, não afecta o cálculo de volume dragado. No entanto, a modelação batimétrica deve ter, também, como compromisso a avaliação da qualidade da dragagem, ou seja, se a cota de dragagem foi atingida e, para este efeito, a utilização de um MB de maior resolução (MBDO) é aconselhável.

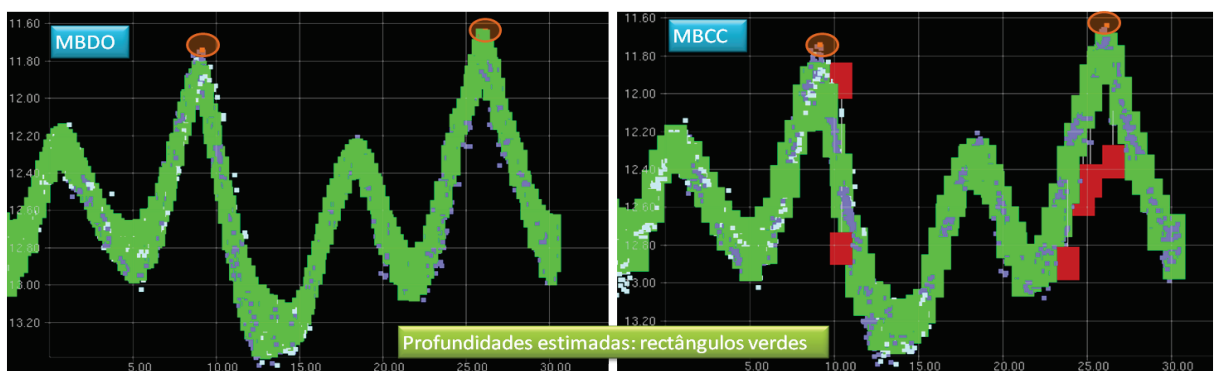


Figura 4.27 - Faixas 2D numa zona dragada a jusante do cais Comercial (Setúbal)

A Figura 4.28 ilustra as diferenças entre o MBDO e o PBF tradicional, observando-se uma vez mais a elevada conformidade do MBDO e a adequada representação das faixas não dragadas.

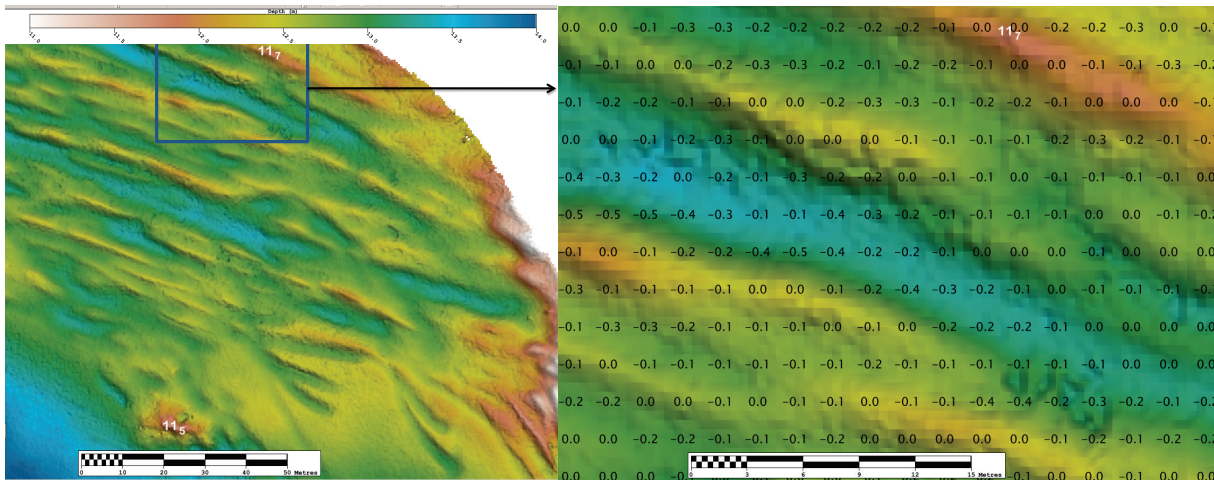


Figura 4.28 – Diferenças (m) entre o PBF tradicional e o MBDO Comercial (zona dragada)

Em suma, constata-se que um dos aspectos mais importante a considerar na modelação batimétrica consiste no próprio objectivo do LH. Supondo que o objectivo do LH de Setúbal passava pela caracterização geomorfológica da dinâmica sedimentar, verificava-se, de acordo com a Figura 4.29, a inadequabilidade do MB com 1 m de resolução, por este não representar adequadamente as dunas de pequeno comprimento de onda (cerca de 20 cm de altura). No entanto, tendo em consideração que o objectivo principal do presente trabalho consistiu na aplicabilidade à cartografia náutica, qualquer um dos MB é adequado por a diferença entre a sonda mínima e a profundidade estimada dos MB ser inferior à incerteza máxima admissível para a Ordem do LH.

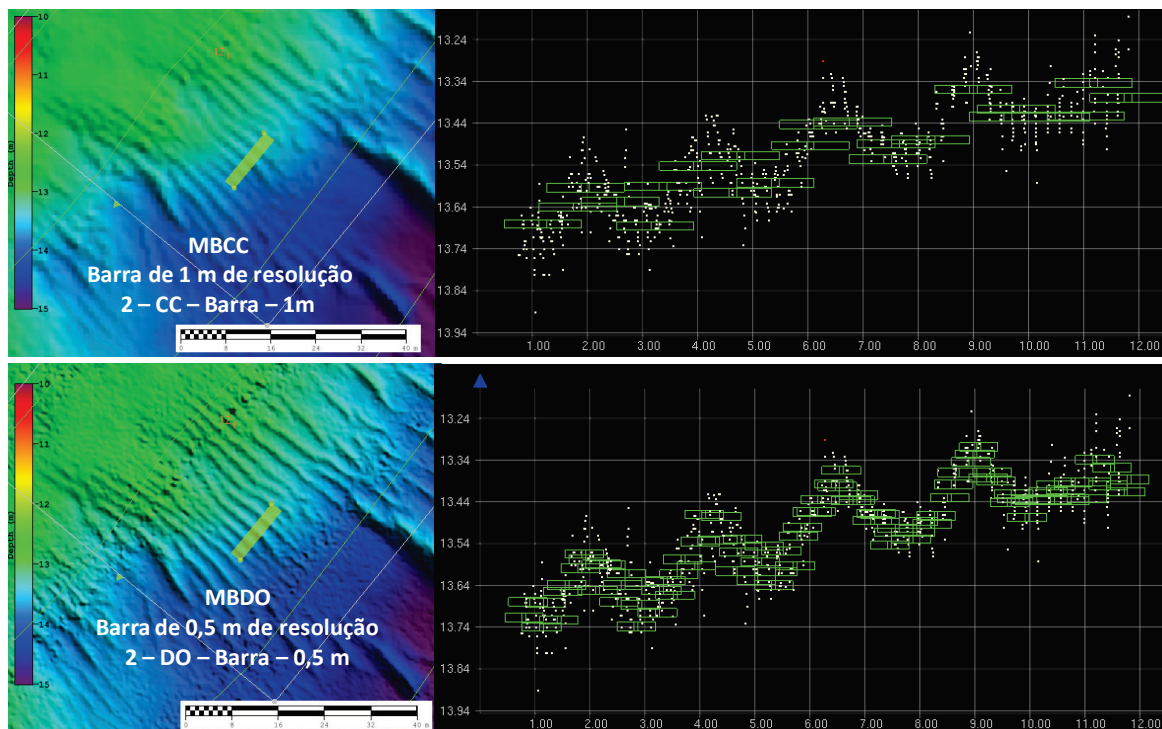


Figura 4.29 - Representação das dunas de pequeno comprimento nos MB

5. Conclusões e recomendações

5.1 Conclusões

As potencialidades do CUBE não se limitam a uma interpretação estatisticamente fundamentada dos dados batimétricos adquiridos com SMF. De facto, as profundidades estimadas são a representação mais fidedigna do relevo marinho desde que cumpridos os requisitos de incerteza e as normas e procedimentos estipulados para a aquisição de dados. Para além do CUBE minimizar a subjectividade inerente ao processamento tradicional, revela-se também como uma ferramenta eficiente para minimizar o tempo de processamento. Com base no novo fluxograma de processamento de dados proposto, pode afirmar-se que o processamento é mais rápido, cerca de 33% em fundos irregulares e cerca de 67% em fundos regulares, comparativamente ao processamento tradicional.

Em regra, constata-se que as diferenças encontradas entre as superfícies geradas com o CUBE e os PBF tradicionais dos LH analisados são inferiores a metade do valor da incerteza vertical das sondas. Numa abordagem mais conservativa, e subtraindo às profundidades estimadas a incerteza da estimação nodal, verifica-se que os MB são menos profundos que os PBF tradicionais num valor inferior, igualmente, a metade da incerteza vertical das sondas.

Quando um dos axiomas do CUBE é violado, o algoritmo não tem elasticidade suficiente para executar a sua tarefa primária, ou seja, providenciar adequadamente a estimação da profundidade e a incerteza associada a um nodo. Uma adequada parametrização do algoritmo e uma análise cuidada das diversas camadas de informação são mandatórias. Nos casos em que o algoritmo não efectue uma adequada estimação da profundidade, o hidrógrafo deve designar uma sonda mínima e obrigar o algoritmo a assimilar para o nodo mais próximo o valor da sonda designada.

Relativamente ao cálculo de volumes dragados, a principal conclusão consiste na possibilidade de utilizar quer a superfície inicial de processamento quer a superfície validada resultantes do fluxograma apresentado, dado que se verificam diferenças irrelevantes em termos de cálculo de volume dragado. Este resultado revela-se de grande importância uma vez que possibilita que o cálculo do volume de dragados seja efectuado praticamente após a aquisição dos dados. No entanto, para efeitos de controlo de qualidade das operações de dragagem considera-se recomendável que se utilize sempre a superfície CUBE validada (CUBE 3 ou CUBE 4) de máxima resolução espacial possível (MBDO).

Na representação de objectos ou na presença de fundos irregulares verifica-se um melhor comportamento dos MBDO, nomeadamente, na presença de uma sobreposição entre faixas sondadas de 50% (200% de cobertura). Deve-se ter em consideração que a densidade de sondas provenientes dos SMF aliada à sua resolução espacial pode não ser suficiente para detectar todas as estruturas de interesse. Para os SMF a resolução espacial decresce rapidamente com o aumento da profundidade. De acordo com Hughes Clarke (2011), a resolução do sondador é função da largura do feixe, do espaçamento dos feixes e do algoritmo de detecção do fundo. Por outro lado, a capacidade de detecção de estruturas depende, entre outros factores, da rugosidade, forma e orientação da própria estrutura (Artalheiro *et al.*, 2010). Assim, seguindo as especificações de outros serviços hidrográficos (LINZ, 2010) e de modo a minimizar o anteriormente referido, quando nos LH se detectem objectos, quando exista uma suspeita de detecção ou quando o LH tem como finalidade a busca de objectos ou outras estruturas relevantes, a sobreposição entre faixas sondadas deve de ser de 50%.

Os MBDO definidos pela NOAA estão mais adaptados aos LH de Ordem Especial enquanto que os MBCC estão mais adaptados aos LH de Ordem 1a, no entanto, independentemente das ordens dos LH, os MB devem ser adaptados à irregularidade do fundo marinho e aos requisitos da cartografia náutica.

Os requisitos e especificações definidos pela NOAA (2010b) são adequados aos objectivos dos LH para efeitos da cartografia náutica e, de facto, permitem criar MB que constituem na sua fase final a própria superfície de navegação referida no Capítulo 1. Relativamente aos produtos digitais de navegação, a comunidade internacional está a efectuar esforços para normalizar produtos que englobem superfícies de incerteza com capacidades de manipulação, combinação e uso em diversas tarefas, incluindo as relacionadas com a segurança da navegação. O problema maior coloca-se na cartografia tradicional elaborada em papel. Nesta, são utilizados diagramas de compilação para representação da incerteza associada aos valores de sonda cartografados que, basicamente, referem por áreas, as Ordens dos LH que serviram de fonte à construção de uma CN. Neste sentido, uma abordagem conservadora à modelação batimétrica é possível de considerar. De facto, os MB conservativos, baseados na subtracção da incerteza final às profundidades, são um produto mais consonante com os objectivos da cartografia náutica em papel, uma vez que esta não permite a manipulação das superfícies de incerteza nem a utilização de sistemas automáticos de gestão ou avaliação de riscos.

O fluxograma de processamento de dados proposto termina com a elaboração de produtos de base cartográfica. Neste aspecto, convém realçar que os produtos finais do processamento de dados de um LH por parte do hidrógrafo devem ser os seguintes:

- A. CUBE 3 e uma camada de informação de sondas designadas
- B. CUBE 4 para efeitos de geração de produtos gráficos

A selecção por parte dos cartógrafos da opção A ou B como produtos para geração de produtos de base cartográfica deve ser alvo de análise em função das aplicações de processamento disponíveis e da integração com a base de dados cartográfica.

5.2 Recomendações

5.2.1 CARIS

O filtro automático para rejeição de sondas existente no HIPS (*Surface Filter*) tem em consideração a distância vertical das sondas à profundidade do nodo mais próximo (CARIS, 2011a), situação esta que não é apropriada para fundos irregulares. Assim, com base no trabalho desenvolvido foi solicitada à CARIS a adaptação do *Surface Filter* de modo a que este tenha em consideração o declive do fundo, tal como ilustrado na Figura 5.1.

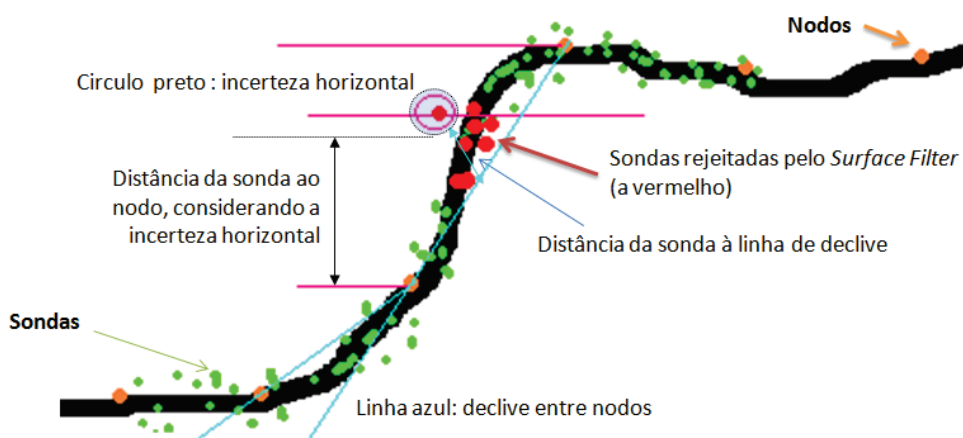


Figura 5.1 - Importância do declive no *Surface Filter*

5.2.2 CUBE

No CUBE, a ponderação e/ou diferenciação das sondas faz-se pela estimação da sua incerteza (valor quantitativo) contrariamente ao processamento humano, que faz um julgamento apreciativo. A questão coloca-se na forma como a estimação das incertezas é efectuada. Actualmente, de acordo com Calder e Wells (2007), o CUBE utiliza um modelo preditivo para a determinação da incerteza, tal como o desenvolvido por Hare *et al.* (1995). No entanto, tal como referido pelos autores e sabendo-se de diversos factores de incerteza não presentes no modelo preditivo, como por exemplo, as variações temporais da velocidade de propagação do som ao longo da coluna de água, espera-se que o algoritmo evolua, permitindo que os dados em si expressem a informação necessária à quantificação da incerteza, utilizando dados redundantes, tais como, os adquiridos em fiadas de verificação ou de calibração do modelo de incerteza.

Da mesma forma, a própria assumpção, por parte do algoritmo, de que a distribuição das sondas é normal não é de todo a melhor aproximação, nomeadamente, em fundos irregulares ou na presença de objectos com faces quase verticais. Uma das formas de contornar este aspecto consiste no incremento da resolução dos MB, tal como sugerido pela NOAA, mas para tal tem de se atender à densidade dos dados obtidos, assim como, à sua resolução espacial. Existe sempre a possibilidade de utilizar diferentes parametrizações do *Estimate Offset*, tal como sugerido por Vásquez (2007). No entanto, esta última sugestão dificulta o processamento de dados, por obrigar a criar parametrizações do algoritmo para cada situação específica e dificultar o controlo de qualidade dos produtos finais, nomeadamente, por parte de utilizadores menos experientes. Por esta razão, a NOAA fixou o parâmetro *Estimate Offset* nos requisitos dos MB.

Outra preocupação da comunidade internacional e referida por Calder (2010) consiste na criação de superfícies de resolução variável dependentes do relevo que assimilassem numa única superfície os conceitos associados aos MBDO e MBCC, ou seja, que na presença de fundos regulares permitisse uma resolução mais genérica e que na presença de fundos irregulares houvesse um incremento da resolução de modo a permitir uma estimação da profundidade mais próxima dos requisitos da busca de objectos.

5.2.3 Instituto Hidrográfico

Tal como demonstrado nos resultados da presente dissertação o CUBE pode ser utilizado no processamento de dados batimétricos e na geração de MB que constituem os PBF dos LH a serem utilizados na cartografia náutica. Não é provável que o IH actualize os requisitos mínimos de máxima incerteza admissível para a execução dos LH, uma vez que estes integram a base normativa da OHI (2008). No entanto, o IH deve de criar, à semelhança da NOAA (2010b), uma base normativa para os dados, documentos e produtos finais a entregar ao IH, incluindo os LH realizados por equipas do próprio IH, para homologação e avaliação de procedimentos que permitam um efectivo controlo de qualidade dos produtos finais dos LH. Uma das mais-valias do CUBE consiste no facto de permitir uma uniformidade de critérios no processamento de dados e, conseqüentemente, minimizar a subjectividade do processo de interpretação por parte do hidrógrafo.

No que concerne às especificações relativas à sobreposição entre faixas adjacentes nos LH de Ordem 1a e Ordem Especial, sugere-se que o IH actualize a norma (Instituto Hidrográfico, 2008a) de modo a contemplar o referido a este propósito na secção 5.1.

A utilização de MB como PBF dos LH levanta outra questão no IH, a qual se prende com a necessidade de adaptar ou criar uma nova base de dados hidrográficos que suporte o arquivo e a manipulação das superfícies e a geração de outros produtos de base cartográfica a partir dos MB dos LH.

5.3 Trabalho futuro

Do trabalho realizado surgem oportunidades de trabalho futuro a desenvolver, uma a montante dos MB finais dos LH e, duas a jusante.

A montante nasce a necessidade de estabelecer especificações para os produtos finais definidos no fluxograma de processamento de dados e, adaptar os MB aos requisitos mínimos dos LH estabelecidos pela OHI. Existe à partida toda uma base de trabalho já enunciada nas especificações da NOAA, no entanto, e não esquecendo outras bases normativas sugere-se, tal como requerido pela LINZ (2010), uma visão mais circunstanciada que englobe os requisitos mínimos da OHI (2008) e, conseqüentemente, uma actualização das especificações nacionais para a execução dos LH, tal como sugerido na secção 5.2.3. Por outro lado, o critério para designação de sondas definido pela NOAA (2010b) é demasiado exigente, tornando o processamento de dados com o fluxograma proposto, um sinónimo do processamento tradicional. Assim, na presença de fundos muito irregulares, a aquisição de dados deve ser tal que permita um incremento da resolução e minimize a necessidade de designação de sondas. No caso de se julgar essencial manter os critérios de designação de sondas então, sugere-se a utilização dos MB conservativos, uma vez que minimizam essa necessidade.

A jusante dos MB finais dos LH, é necessária a implementação de uma base de dados de suporte às superfícies que permita a sua análise, manipulação e geração de produtos derivados. É ainda relevante o estudo das formas mais adequadas de generalização dos MB dos LH no que concerne aos requisitos da cartografia náutica. De facto, a supressão usual de sondas e a utilização de modelos TIN para geração das isóbatas não são as formas mais adequadas quando da utilização de MB de malha regular de elevada resolução, tal como exposto e sugerido pela CARIS (2011c). Neste documento é sugerido que seja criada uma esfera, em função da escala do LH, que role sobre a superfície e que gere as isóbatas. Adicionalmente, pode retirar-se mais detalhe à superfície, dando primazia às sondas mínimas e transferindo o seu valor para nodos vizinhos, tendo sempre em consideração a incerteza da estimação da profundidade. Esta metodologia é ilustrada na Figura 5.2.

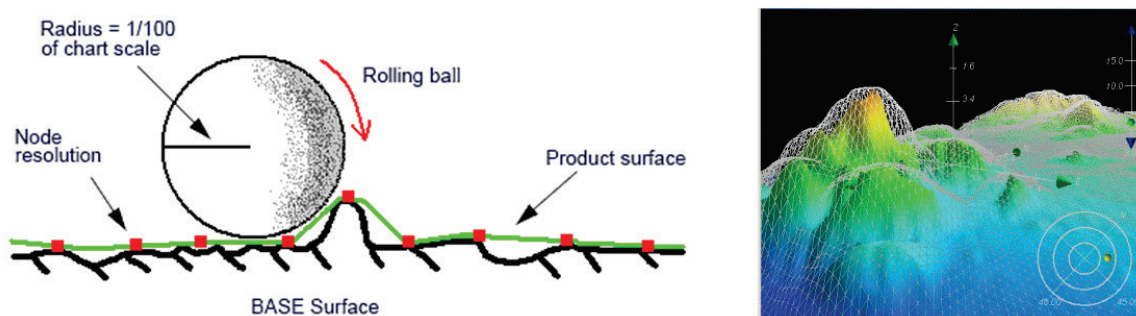


Figura 5.2 - Geração de produtos de base cartográfica⁴⁷

⁴⁷ Fonte: CARIS (2011c).

Referências Bibliográficas

- Artalheiro, F., Vicente, J. (2009): "Requisitos para os Levantamentos Hidrográficos e Capacidades dos Sistemas Utilizados", Cartografia e Geodesia 2009, pp. 462-473.
- Artalheiro, F., Silva, R., Monteiro, C. (2010): "Contributo para a interpretação dos requisitos dos LH estabelecidos na S-44", 1as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico (em publicação).
- Broen, S. (2010): "Handling large amounts of multibeam data", Management of massive point cloud data: wet and dry, Nederlandse Commissie voor Geodesie, Netherlands Geodetic Commission 49, Delft, The Netherlands, pp. 75-84.
- Bottelier, P., Briese, C., Hennis, N., Lindenbergh, R., Pfeifer, N. (2004): "Distinguishing features from outliers in automatic kriging-based filtering of MBES data: a comparative study", Proceedings of geoENV'04, The Fifth European Conference on Geostatistics for Environmental Applications, Neuchatel, Switzerland, 2004.
- Calder, B. (2003): "Automatic statistical processing of multibeam echosounder data." Int. Hydro. Review, Vol. 4(1), pp. 53-68.
- Calder, B., Mayer, L. (2003): "Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data", Geochemistry Geophysics Geosystems, Vol. 4, 2003.
- Calder, B., Wells, D. (2007): "CUBE User's Manual", Version 1.13, University of New Hampshire.
- Calder, B. (2010): "CUBE and Variable Resolution Grids", NOAA Field Procedures Workshop, Seattle.
- CARIS (2011a): "HIPS and SIPS 7.1 - User Guide", CARIS.
- CARIS (2011b): "CARIS GIS 4.5 - User Guide", CARIS.
- CARIS (2011c): "BASE Editor 3.2 - User Guide", CARIS.
- deMoustier, C. (2004): "Fundamentals of echo-sounding II - 36L04C_sonar2_Words_26", 36th Multibeam Sonar Training Course (Norway), Ocean Mapping Group, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Canada.
- deMoustier, C. (1993): "Signal processing for swath bathymetry and concurrent seafloor acoustic imaging", Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration, Moura and Louttie, p.329-354.
- Debese, N., Freulon, X., Mevel, C. (1998): "Application d'un estimateur robuste à la détection des erreurs ponctuelles dans les données bathymétriques", Canadian Hydrographic Conference - CHC'98, Victoria.
- Debese, N., Bisquay, H. (1999): "Automatic Detection of Erroneous Soundings in Multibeam Data through a Robust Estimator", Proceedings of the International Hydrographic Review, LXXVI (1), pp. 49-63.
- Debese, N. (2007): "Multibeam Echosounder Data Cleaning Through an Adaptive Surface-based Approach", Proceedings of US Hydrographic Conference.
- Elmore, P. A. and C. Steed (2008): "Algorithm Design Study for Bathymetry Fusion", United States Navy, Naval Research Laboratory, Marine Geosciences Division, Stennis Space Center.
- FIG (2010): "Guidelines for the planning, execution and Management of Hydrographic Surveys in Ports and harbours", International Federation of Surveyors – FIG Commission 4 (Working Group Hydrographic Surveying in Practice), Copenhagen.
- Hammerstad, E. (1998): "EM Technical Note - Multibeam Echo Sounder Accuracy", Kongsberg-Simrad.
- Hare, R., Godin, A., Mayer, L. (1995): "Accuracy Estimation of Canadian Swath (Multi-beam) and Sweep (Multi-transducer) Sounding Systems", Canadian Hydrographic Service, Ottawa.
- Hughes Clarke, J. (1996): "Are you really getting full bottom coverage?", Ocean Mapping Group, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick. (Disponível em http://www.omg.unb.ca/~jhc/coverage_paper.html).
- Hughes Clarke, J. (2011): "Optimal use of multibeam technology in the study of shelf morphodynamics", Sedimentology, Special Publication (em publicação).

Instituto Hidrográfico (2007): “Relatório final de trabalho (REL FT HI 05/07) - Levantamento hidrográfico do passo da barra sul do porto de Lisboa”, Instituto Hidrográfico.

Instituto Hidrográfico (2008a): “Especificação Técnica para Planeamento, Execução e Processamento de Levantamentos Hidrográficos”, Instituto Hidrográfico.

Instituto Hidrográfico (2008b): “Procedimento de Trabalho para o processamento de dados SMF”, Instituto Hidrográfico.

Instituto Hidrográfico (2010): “Relatório final de trabalho (REL FT HI 21/09) - Levantamento topo-hidrográfico nas Ilhas Selvagens”, Instituto Hidrográfico.

Instituto Hidrográfico (2011): “Relatório final de trabalho (REL FT HI 07/11) - Levantamento hidrográfico em Setúbal”, Instituto Hidrográfico.

Kongsberg, (2004a): “EM 120 Multibeam Echo Sounder - Operator Manual”, Kongsberg Maritime.

Kongsberg, (2004b): “EM 710 Multibeam Echo Sounder - Operator Manual”, Kongsberg Maritime.

Kongsberg, (2005): “EM 3002 Multibeam Echo Sounder - Operator Manual”, Kongsberg Maritime.

Kongsberg, (2007): “Multibeam Echosounder and Seafloor Information System Technical Apresentação”, Kongsberg Maritime. (Trabalho não publicado apresentado no âmbito de um curso de formação em Lisboa).

Kongsberg, (2010): “Seafloor Information System - Reference Manual for EM 3002 - Release 3.7”, Kongsberg Maritime.

Lockhart, C., Lockhart, D., Martinez, J. (2008): “Comparing LIDAR and Acoustic Bathymetry Using Total Propagated Uncertainty (TPU) and the Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator (CUBE) Algorithm” Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference.

LINZ (2010): “Contract Specifications for Hydrographic Surveys”. Version 1.2. Land Information New Zealand

Monteiro, C., Vicente, J., Silva, R. (2010): “Validação de dados hidrográficos”, 1as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico, (em publicação).

NOAA (2010a): “Field Procedures Manual”, National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Coast Survey, Abril 2010.

NOAA (2010b): “NOS Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables”, National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Coast Survey, Abril 2010.

NOAA (2011a): “Field Procedures Manual”, National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Coast Survey, Maio 2011.

NOAA (2011b): “NOS Hydrographic Surveys Specifications And Deliverables”, National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Coast Survey, Abril 2011.

OHI (2000): “IHO Transfer standard for Digital Hydrographic data”, 3ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

OHI (2005): “M-13 IHO Manual on Hydrography”, 1ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

OHI, (2008): “S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys”, 5ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

OHI (2009): “C-17 Spatial Data Infrastructures - The Marine Dimension”, 1ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

OHI, (2010a): “S-100 Universal Hydrographic Data Model”, 1ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

OHI, (2010b): “Regulations of the IHO for International Charts and Chart Specifications of the IHO”, 5ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

ONSWG (2006): “Description of Bathymetric Attributed Grid Object (BAG)”, Version 1.0.0, Document Version RELEASE 1.0, Open Navigation Surface Working Group.

Rice, G., Calder, B. (2009): “A Quantitative Approach to the Resolution of Bathymetric Representation”, U.S. Hydro Conference, Norfolk, USA.

- Silva, R. (2009): "Procedures For Assessing Quality Of External Bathymetric Data", University of New Brunswick, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Fredericton, Canada.
- Smith, S., Alexander, L., Armstrong, A. (2002): "The Navigation Surface: A New Database Approach to Creating Multiple Products from High-Density Surveys", *Int. Hydro. Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 12-26.
- USACE (2002): "Hydrographic Surveying Manual", United States Corps of Engineers.
- Vásquez, M. (2007): "Tuning the CARIS implementation of CUBE for Patagonian Waters", Master Thesis on Science in Engineering in the UNB Ocean Mapping Group, University of New Brunswick.
- Veiga, L., Silva, R., Artilheiro, F. (2010): "Levantamentos para fins especiais: dragagens", *Primeiras Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico (em publicação).
- Vicente, J., Monteiro, C., Veiga, L., Sanches, P., Artilheiro, F.(2011) "Modelação Batimétrica com Estimação de Incerteza", VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Porto (em publicação).
- Weekley, R., Goodrich, R., Cornman, L. (2010): "An Algorithm for Classification and Outlier Detection of Time-Series Data", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 27, pp. 94-107.

Apêndice A

Máxima incerteza vertical admissível nos LH

As figuras e tabelas seguintes resultam da aplicação da Fórmula 9 apresentada na secção 2.2. Estas ilustrações pretendem facilitar a análise dos resultados apresentados no Capítulo 4 dado que permitem saber, de forma expedita, o máximo valor de incerteza vertical admissível para as diferentes ordens dos LH, de acordo com os requisitos mínimos definidos pela Organização Hidrográfica Internacional na 5ª Edição da Publicação Especial "S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys".

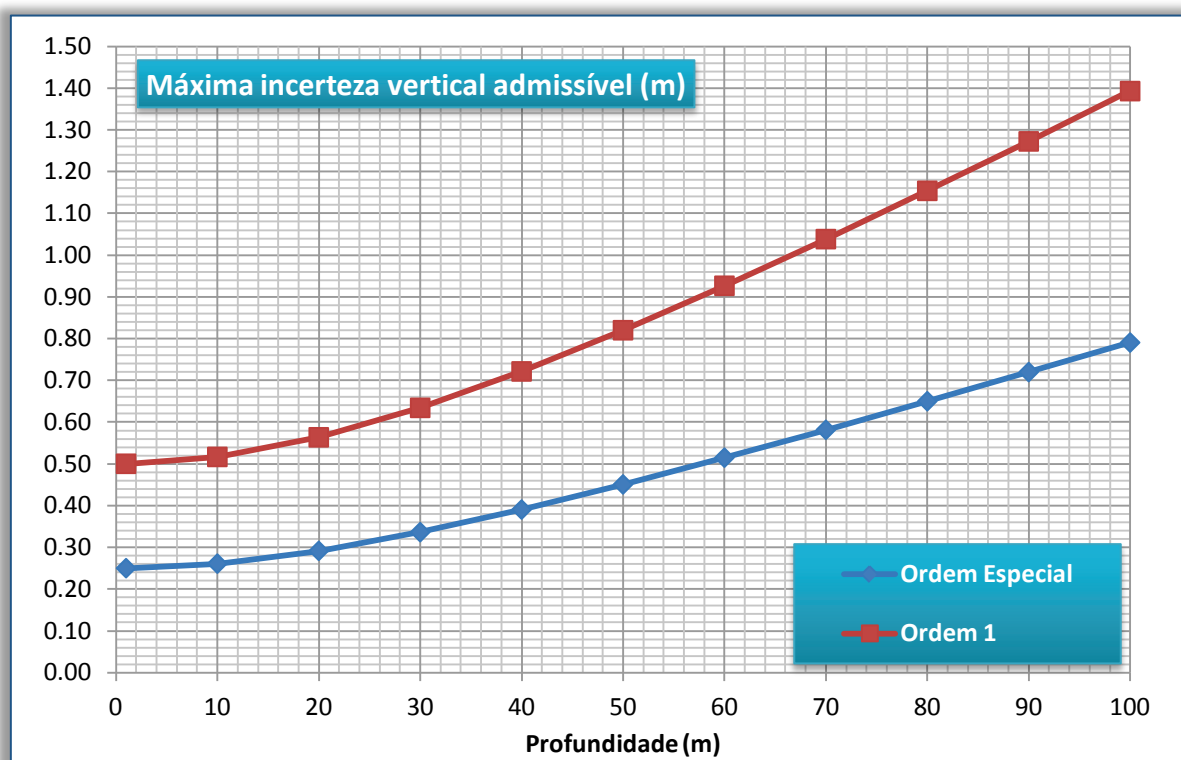


Figura A.1 – Gráfico da máxima incerteza vertical admissível nos LH (até aos 100 m de profundidade)

Tabela A.1 – Máxima incerteza vertical admissível (até aos 100 m de profundidade)

Profundidade (m)	Ordem Especial (m)	Ordem 1 (m)
1	0.25	0.50
10	0.26	0.52
20	0.29	0.56
30	0.34	0.63
40	0.39	0.72
50	0.45	0.82
60	0.51	0.93
70	0.58	1.04
80	0.65	1.15
90	0.72	1.27
100	0.79	1.39

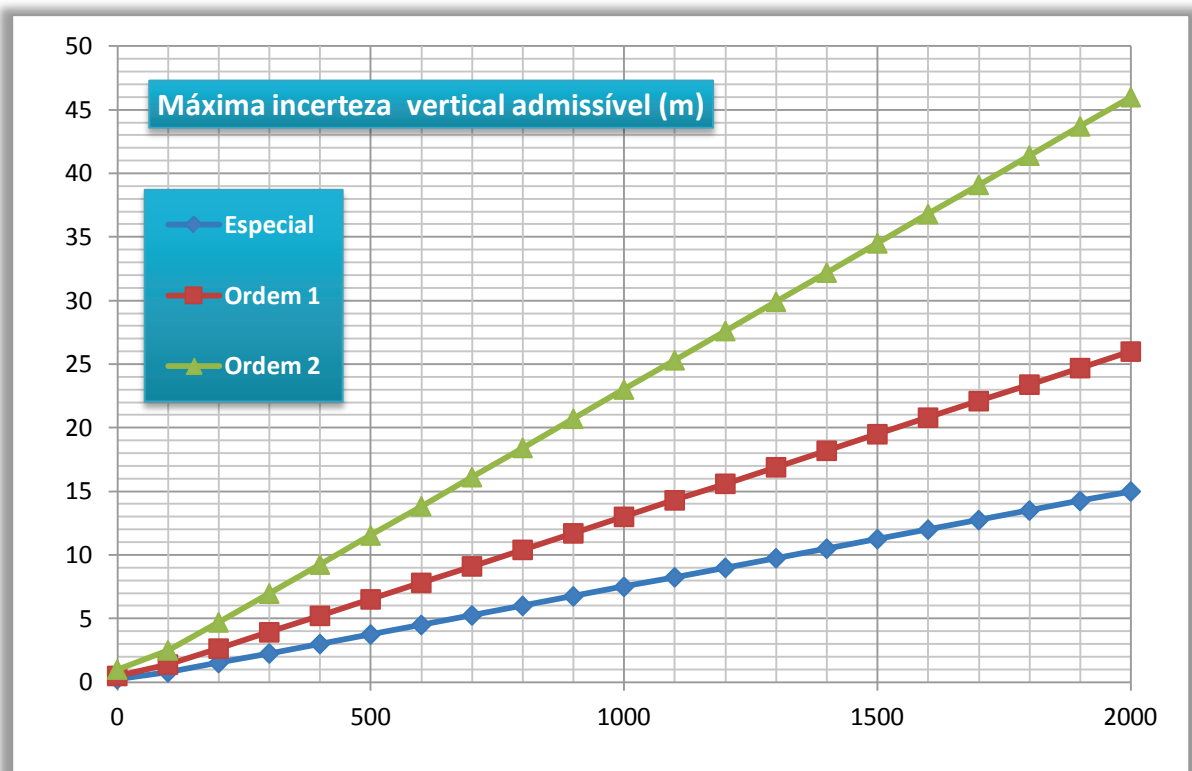


Figura A.2 – Gráfico da máxima incerteza vertical admissível nos LH (até aos 1500 m de profundidade)

Tabela A.2 – Máxima incerteza vertical admissível (até aos 2000 m de profundidade)

Profundidade (m)	Ordem Especial (m)	Ordem 1 (m)	Ordem 2 (m)
0	0.25	0.50	1.00
100	0.79	1.39	2.51
200	1.52	2.65	4.71
300	2.26	3.93	6.97
400	3.01	5.22	9.25
500	3.76	6.52	11.54
600	4.51	7.82	13.84
700	5.26	9.11	16.13
800	6.01	10.41	18.43
900	6.75	11.71	20.72
1000	7.50	13.01	23.02
1100	8.25	14.31	25.32
1200	9.00	15.61	27.62
1300	9.75	16.91	29.92
1400	10.50	18.21	32.22
1500	11.25	19.51	34.51
1600	12.00	20.81	36.81
2000	15.00	26.00	46.01

Apêndice B

Requisitos na instalação e calibração dos SMF

Este apêndice pretende dar a conhecer um conjunto de procedimentos essenciais na instalação dos equipamentos dos sondadores multifeixe (SMF) e na execução das provas de calibração. Pretende-se com este texto, complementar a informação dada no corpo da dissertação considerando, como referência, a constituição base dos SMF apresentados.

B.1. Requisitos de instalação

Após a instalação de um sistema SMF, é necessário efectuar a medição dos diferentes braços e desvios do transdutor, do sensor de movimentos e da antena do sistema de posicionamento relativamente ao ponto de origem do referencial da embarcação (Figura B.1). No SMF EM 3002, a integração dos dados de atitude é efectuada activamente, uma vez que é efectuada a estabilização dos feixes de transmissão e/ou recepção (Kongsberg, 2004).

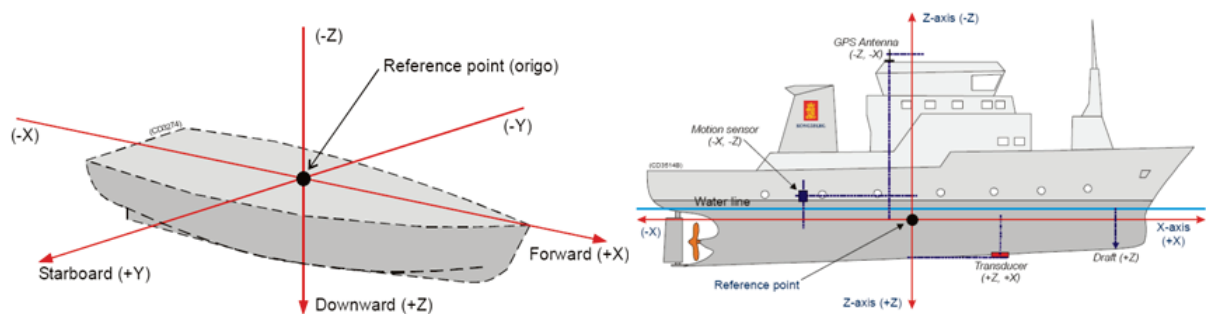


Figura B.1 – Referencial da embarcação¹

Existem situações em que o conhecimento dos braços e, sobretudo, dos desvios, não é possível de efectuar com o nível de exactidão necessário aos LH. Na UAM “ATLANTA”, embarcação utilizada no levantamento hidrográfico (LH) de Setúbal, a instalação utilizada não é fixa, o que não garante a sua imutabilidade temporal ao nível dos desvios de orientação. Nesta embarcação o transdutor é instalado à proa. De modo a manter os movimentos do transdutor em conformidade com os movimentos da embarcação existe uma coluna de instalação fixa e dois cabos esticadores, um em cada bordo, cuja regulação tem que ser efectuada em cada instalação. Assim, de modo a efectivar a correcta determinação dos desvios de orientação são efectuadas provas de calibração. Estas, consistem na medição dos desvios da origem de medição do balanço², do cabeceio³, da proa⁴ e do atraso em tempo⁵ do posicionamento relativamente à medição de profundidades. Os valores determinados são introduzidos na aplicação de aquisição de dados, de modo a serem aplicados no cálculo das coordenadas das sondas no referencial da embarcação.

¹ Fonte: Kongsberg (2004)

² O desvio em balanço resulta dos eixos verticais do sensor de movimentos e do transdutor no plano transversal da embarcação não se encontrarem alinhados.

³ O desvio na medição do cabeceio resulta dos eixos verticais do sensor de movimentos e do transdutor no plano longitudinal da embarcação não se encontrarem alinhados.

⁴ O desvio entre a medição da proa e o alinhamento do transdutor resulta da soma do desvio do azimute do transdutor, em relação à perpendicular à linha de proa da embarcação, e do erro de alinhamento das duas antenas GPS com a proa da embarcação.

⁵ A latência ou atraso do posicionamento relativamente à medição da profundidade deve-se ao intervalo de tempo decorrido entre o registo da posição e o registo da profundidade. Na UAM “ATLANTA” é utilizado um sinal de sincronismo entre o SEAPATH e a unidade de processamento do SMF, o que minimiza a latência para o nível relacionado com a própria metodologia de transferência de informação, ou seja, 0,01 s ou 0,005 s consoante seja utilizado um cabo série ou de rede, respectivamente, e de acordo com NOAA (2010a).

Nos navios hidrográficos a instalação de equipamentos é efectuada de forma permanente, requerendo apenas alguns cuidados nos casos em que seja necessária a manutenção ou substituição de componentes. Nas embarcações de sondagem são instalados sistemas portáteis, pelo que, sempre que exista uma nova instalação é necessário determinar os seguintes elementos:

- X, Y e Z do transdutor relativamente ao ponto de referência (RP)
- X, Y e Z do sensor inercial, doravante designado por *motion reference unit* (MRU) relativamente ao RP
- X, Y e Z da antena 1 do sistema de posicionamento *global positioning system* (GPS) relativamente ao RP
- Distância e azimute entre a antena 1 e a antena 2 do GPS⁶
- Z da linha de água relativamente ao RP
- Desvios de orientação dos vários sensores:
 - Do vector antena relativamente à proa da embarcação
 - Do referencial do MRU relativamente ao referencial da embarcação
 - Do referencial do transdutor relativamente ao referencial da embarcação
- Desvio na medição da velocidade de propagação do som (VPS) entre o SVP e o PROBE
- Avaliação do sincronismo em tempo (1 PPS)
- *Settlement, squat* e curva de calados da embarcação

Quando se conhece o centro de gravidade (CG) de uma embarcação, este deve ser adoptado como RP. Quando desconhecida a localização do CG, a origem adoptada deve ser a própria localização do MRU. Este deve ser instalado na posição mais estável da embarcação sobre a linha de meio navio ou, em alternativa, o mais próximo possível do transdutor (Kongsberg, 2004). Na determinação dos desvios é utilizada a convenção ilustrada na Figura B.2.

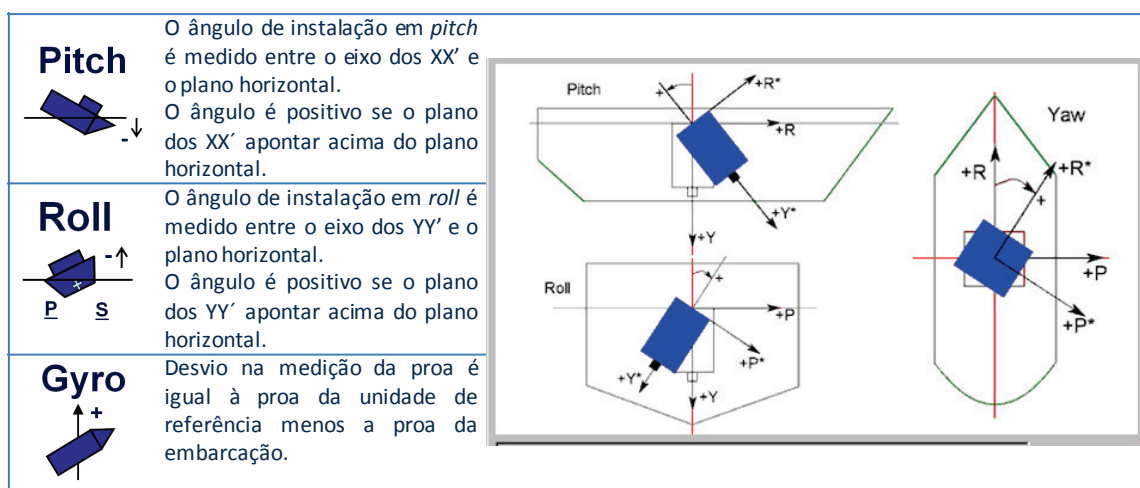


Figura B.2 – Convenção para a medição dos desvios de orientação⁷

⁶ A utilização de duas antenas GPS, conjuntamente com a informação de atitude, serve para a determinação da proa.

⁷ Adaptado de Kongsberg (2004).

A melhor metodologia para obtenção dos braços entre sensores e dos desvios de orientação consiste na colocação da embarcação a seco, no seu posterior nivelamento e no estabelecimento de uma rede local de observações. A utilização de equipamentos geodésicos é essencial para obter valores de incerteza de acordo com as especificações dos fabricantes, tendo em consideração os requisitos dos LH (OHI, 2008). De acordo com Kongsberg (2004), os valores de instalação devem ser determinados, tendo em consideração as incertezas máximas (a 95% de confiança) expressas na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Incerteza máxima a 95% de nível de confiança⁸

Sensor		Incerteza máxima
MRU	1. Desvio do plano <i>roll/pitch</i> relativamente ao plano horizontal da embarcação	$\pm 0.05^\circ$
	2. Localização vertical relativamente ao RP	± 2 cm
	3. Localização horizontal relativamente ao RP	± 5 cm
Transdutor	4. Proa	$\pm 0.1^\circ$
	5. Desvio em <i>roll</i> relativamente ao plano horizontal	$\pm 0.025^\circ$
	6. Desvio em <i>pitch</i> relativamente ao plano vertical	$\pm 0.1^\circ$
MRU	7. Localização vertical do MRU	± 10 cm ⁹
	8. Localização horizontal do MRU	± 5 cm ¹⁰
	9. Alinhamento proa MRU com proa embarcação	$\pm 0.1^\circ$
Posição Antenas GPS	10. Proa da embarcação	$\pm 0.1^\circ$
	11. Alinhamento com proa da embarcação	$\pm 0.25^\circ$
GPS	12. Localização vertical das antenas	2 cm
	13. Localização horizontal das antenas	5 cm
	14. Linha de água	2 cm

O gráfico na Figura B.3 ilustra a tolerância admitida na determinação do desvio do plano *roll/pitch* relativamente ao plano horizontal da embarcação, em função da distância entre o MRU e o transdutor. Esta questão é importante de modo a que a incerteza na determinação da profundidade não exceda os 2 cm (ter em atenção a nota de rodapé número 9).

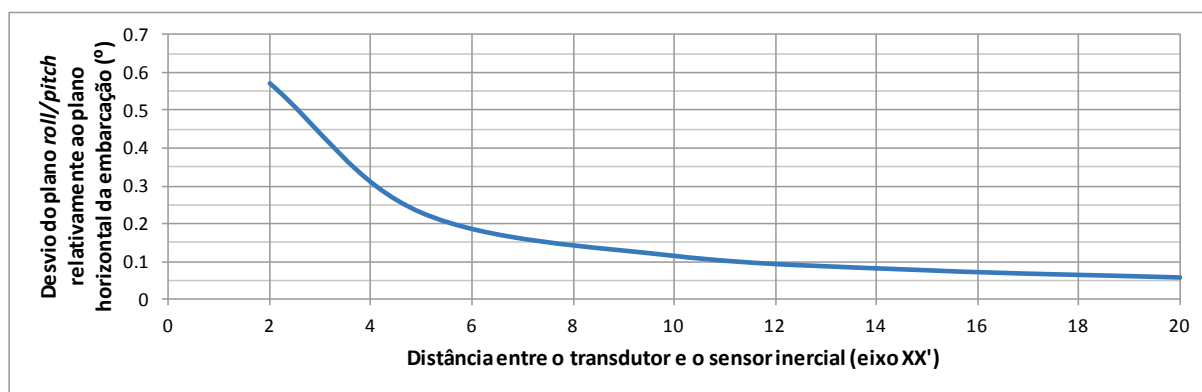


Figura B.3 – Tolerância na determinação do desvio do plano *roll/pitch* relativamente ao plano horizontal da embarcação¹¹

⁸ Adaptada de Kongsberg (2004).

⁹ O valor referido assume uma distância entre o sensor inercial e o transdutor de 20 m. Para distâncias inferiores este valor pode ser superior.

¹⁰ No caso do MRU não se encontrar na vertical do transdutor, a incerteza mencionada deve ser referida ao transdutor, ou seja, propagada tendo em consideração o braço entre o MRU e o transdutor.

Existem várias abordagens para a introdução dos braços e desvios de orientação. No entanto, tendo em consideração as características especiais dos sondadores da Kongsberg, deve ser utilizada, preferencialmente, a seguinte metodologia:

- No SEAPATH, o posicionamento é transposto da antena GPS para o RP juntamente com os dados de atitude. Ambos são corrigidos dos valores de X, Y e Z dos braços e dos respectivos desvios de orientação das antenas GPS e do MRU. Esta parametrização é efectuada através do software próprio do SEAPATH. Neste software é igualmente definida a frequência de corte da ondulação e definidos os formatos de saída de dados para a unidade electrónica de processamento do sondador.
- No SMF, através da aplicação *Seafloor Information System* (SIS), o posicionamento e os dados de atitude são projectados para o transdutor e, corrigidos dos desvios de orientação do transdutor. São ainda introduzidos os valores de calibração determinados nas provas.

Para além da parametrização do sistema de coordenadas a utilizar é necessário ainda garantir o sincronismo em tempo dos vários sensores de modo a evitar latências. Para tal deve ser escolhida a hora GPS como referência para os diferentes datagramas e activada a sincronização entre os equipamentos.

B.2. Importância da atitude da embarcação

De modo a entender a relevância de uma correcta medição da atitude da embarcação nas próximas secções são resumidos os impactes de erros nessas medições nos requisitos dos LH. Todas as equações foram retiradas de Wells (2004) e podem, igualmente, ser consultadas em OHI (2005).

B.2.1. Balanço

Os sistemas SMF efectuem a medição do tempo de trajecto do raio sonoro e do respectivo ângulo de incidência (θ). A partir do tempo de trajecto do raio sonoro é determinada a distância inclinada (r). Com base nestes valores é, então, possível determinar a sonda (z) e a distância horizontal (x). A medição das sondas e a sua localização, relativamente ao referencial da embarcação, pode ser sumarizada nas Equações 1 e 2:

$$z = r \cos(\theta) \quad (1)$$

$$x = r \sin(\theta) \quad (2)$$

O erro na medição da profundidade (dz) e na sua localização (dx) em função de um erro na medição do balanço ($\delta\theta$) pode ser sumarizado nas Equações 3 e 4:

$$dz = z \tan(\theta) \delta\theta \quad (3)$$

$$dx = z \delta\theta \quad (4)$$

A Figura B.4 mostra o erro cometido na medição da profundidade em função de um erro na medição do balanço. Para um ângulo de incidência de 60° e um erro na medição do balanço de $0,1^\circ$, o erro na medição da profundidade é de 0,3% da profundidade.

¹¹ Adaptado de Kongsberg (2004).

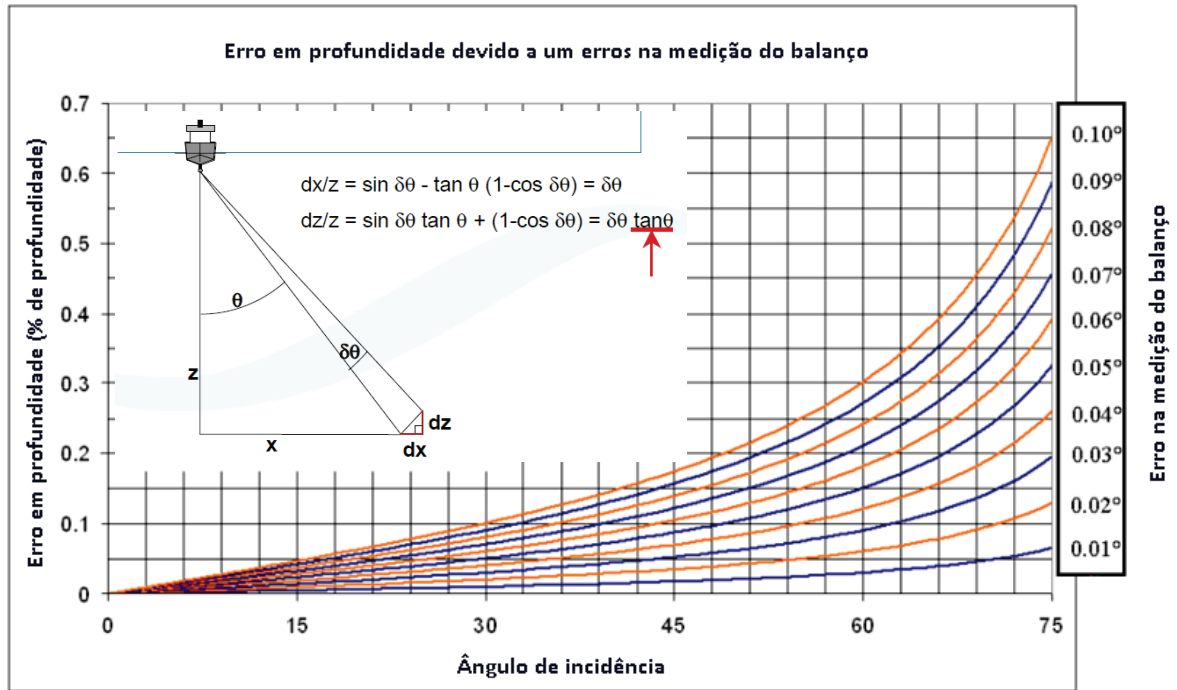


Figura B.4 – Erro em profundidade devido a erros na medição do balanço¹²

Pode-se efectivar o raciocínio oposto e questionar qual a tolerância máxima no erro da medição do balanço? A Figura B.5 ilustra duas curvas, uma assumindo uma tolerância máxima de 5% da profundidade e outra, assumindo uma tolerância máxima de 2,5% da profundidade, o que equivale, para um ângulo de incidência de 60°, a um erro máximo tolerável de 0,16° e de 0,08°, respectivamente. Note-se que estes valores não incluem as outras fontes de incerteza.

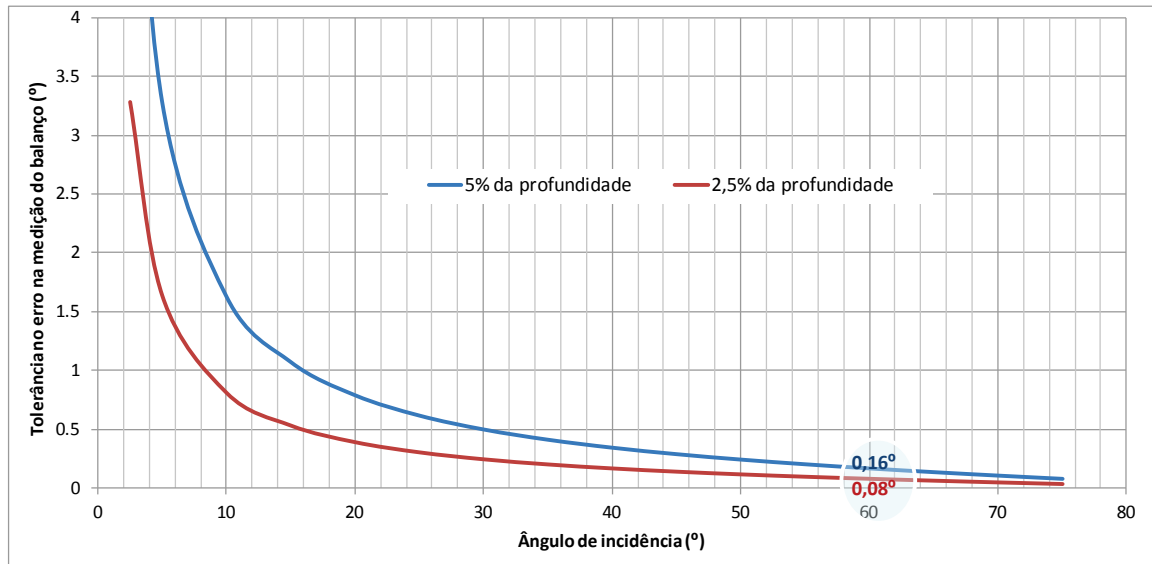


Figura B.5 – Tolerância no erro na medição do balanço em função da profundidade

¹² Adaptado de Wells (2004).

B.2.2. Cabeceio

O erro na medição da sonda (dz) e na sua localização (dx) em função de um erro na medição do cabeceio ($\delta\phi$) pode ser sumarizado nas Equações 5 e 6. O seu impacto é ilustrado na Figura B.6.

$$dz = (1 - \cos(\delta\phi)) z \tag{5}$$

$$dx = z \tan(\delta\phi) \tag{6}$$

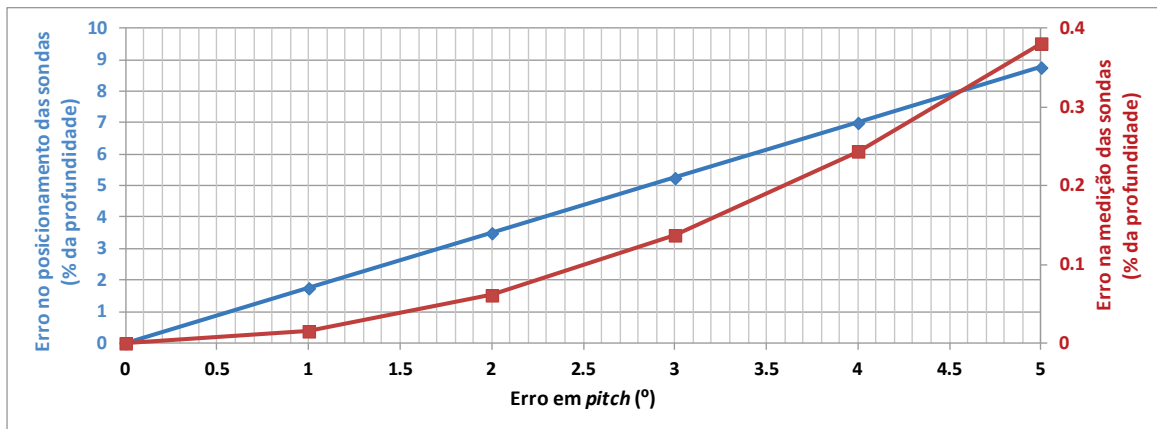


Figura B.6 – Erro no posicionamento e na medição das sondas devido a um erro no cabeceio¹³

B.2.3. Proa

Para determinar o erro na localização de uma sonda (dx) em função de um erro na medição da proa é necessário relacioná-lo com a área insonificada por um feixe. Sendo ($\delta\phi$) metade da largura do feixe e (θ) o ângulo de incidência, e assumindo que a incerteza ao longo do eixo dos XX' (δu) tem de ser menor que o raio da área insonificada naquela direcção, pode definir-se como requisito a incerteza na medição da proa ($\delta\alpha$) dada pela Equação 7. A Figura B.7 ilustra o raciocínio apresentado.

$$\delta\alpha = \frac{\delta\phi}{\sin \theta} \tag{7}$$

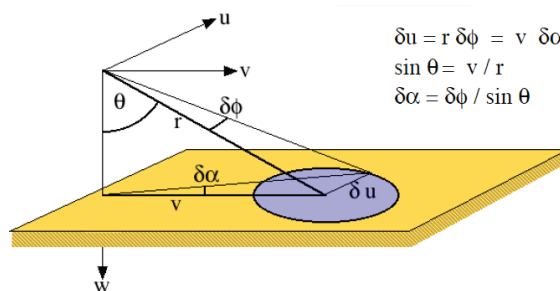


Figura B.7 – Incerteza admissível na medição da proa¹⁴

¹³ Adaptado de Wells (2004).

A Figura B.8 ilustra a máxima incerteza na medição da proa, com particular realce para a curva a vermelho com indicação da informação relativa ao EM 3002.

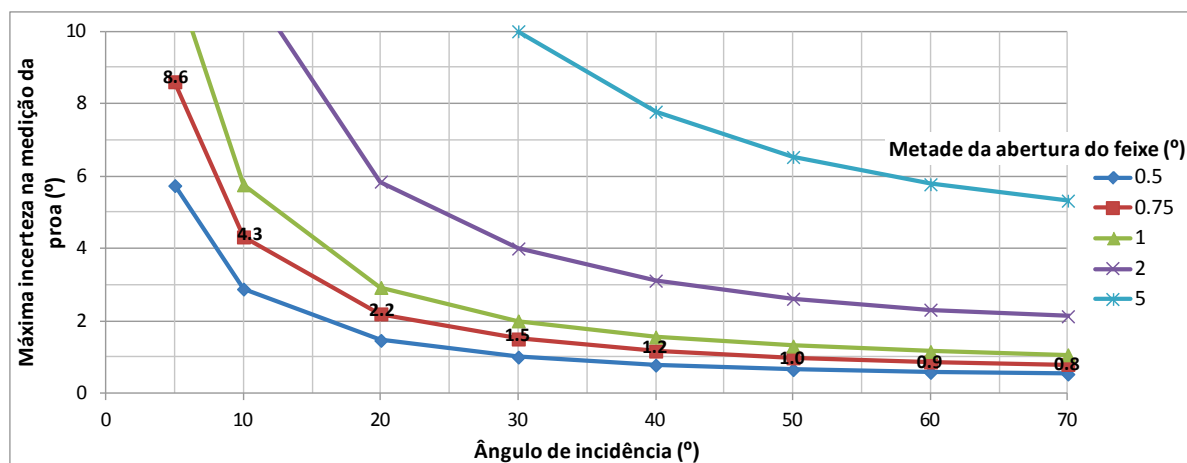


Figura B.8 – Máxima incerteza admissível na medição da proa

B.3. Requisitos na taxa de gravação de dados e no sincronismo

A Figura B.9 ilustra a variação da atitude da embarcação numa situação de estado do mar de pequena vaga. Pode observar-se que entre o segundo 41 e 42, a proa sofreu uma alteração de cerca de 3°, a arfagem cerca de 1m, o cabeceio cerca de 4,5° e o balanço cerca de 5°.

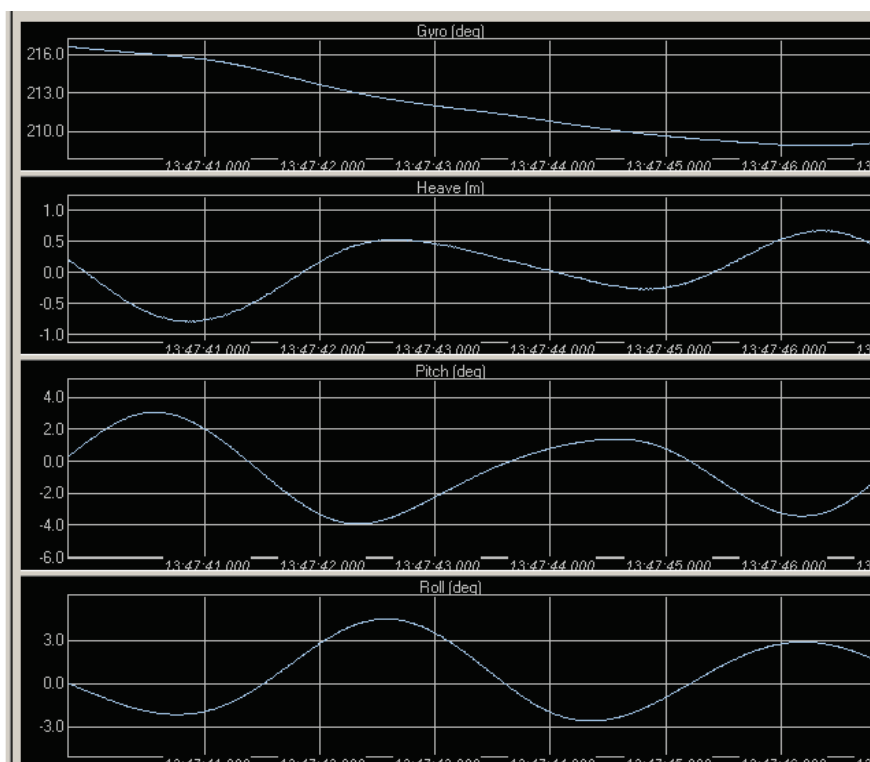


Figura B.9 – Gravação de dados de atitude

¹⁴ Adaptado de Wells (2004).

A observação da Figura B.9 justifica a taxa de aquisição de dados de atitude de 100 Hz dos SMF da Kongsberg. O posicionamento é garantido a uma taxa de 10 Hz nos sistemas RTK e de 5 Hz nos sistemas diferenciais (DGPS). Do mesmo modo se justifica o sincronismo entre as diversas unidades constituintes de um SMF. Só assim é possível responder a uma taxa de transmissão de impulsos acústicos de cerca de 40 Hz, no caso do EM 3002, em profundidades inferiores a 2 m. Para profundidades de 10 m e 20 m, a taxa de transmissão de impulsos é cerca de 20 e 13 Hz, respectivamente. A taxa de transmissão de impulsos depende, numa primeira análise, do tempo de trajecto do sinal acústico e do tempo de processamento do sinal (Kongsberg, 2004). A Figura B.10 ilustra a taxa de transmissão de impulsos observada na operação do EM 3002.

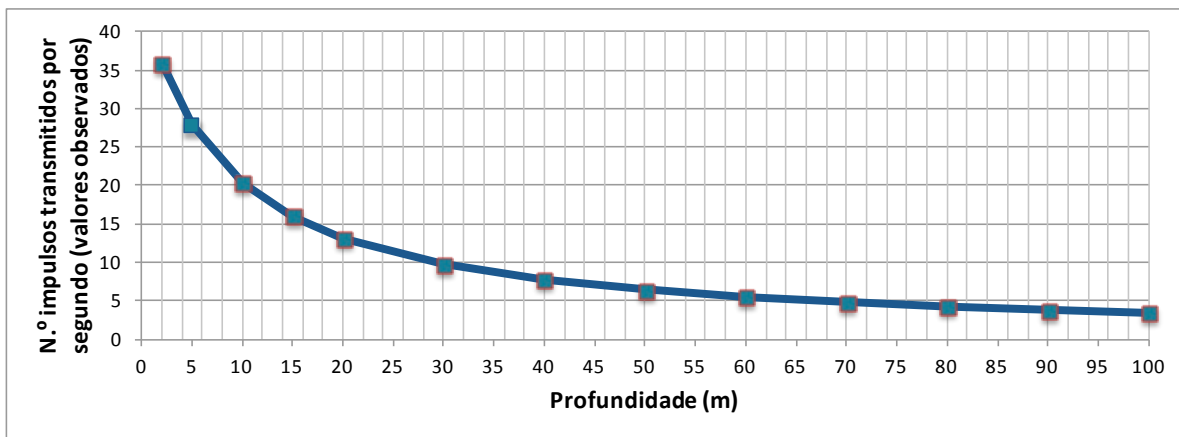


Figura B.10 – Taxa de transmissão de impulsos observada no EM 3002

B.4. A arfagem induzida *versus* erro na medição do cabeceio

Quando se utilizam sensores inerciais e quando a localização do transdutor é diferente do sensor inercial, conhecendo a localização do transdutor e as medições instantâneas da atitude da embarcação, é possível transferir a arfagem medida para a posição do transdutor (OHI, 2005).

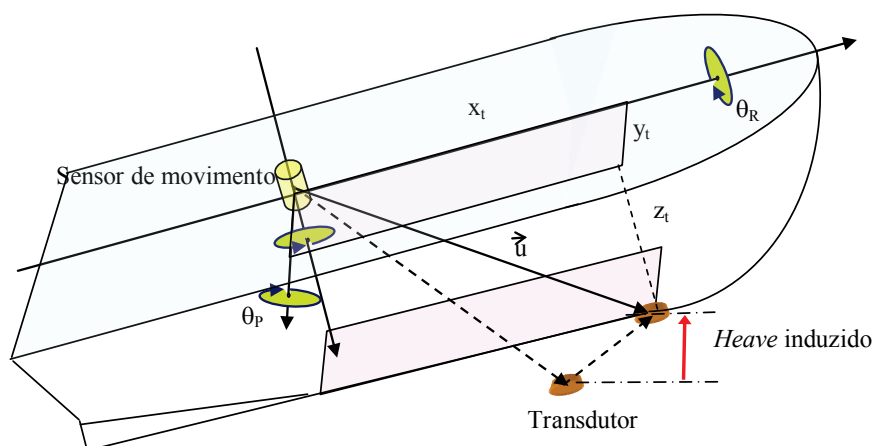
No caso da UAM “Atlanta”, em que o sensor inercial está localizado na linha de meio navio tal como o transdutor, o conhecimento do braço em XX' é suficiente, tal como o ângulo instantâneo do cabeceio. O maior problema inerente a esta metodologia surge quando existe um erro significativo na medição do ângulo do cabeceio que, automaticamente, se transforma num erro na medição das sondas e no seu posicionamento não só devido ao próprio erro em cabeceio mas também devido à arfagem induzida. Simplificando a questão, assumindo que o CG se encontra no RP e abstraindo as outras componentes inerentes à estabilização e formação dos feixes, pode afirmar-se que as componentes do erro na medição da sonda (dz) e na sua localização (dx) devido a uma má determinação da arfagem induzida são dadas pelas Equações¹⁵ 8 e 9, respectivamente, onde (δp) representa o erro na medição do cabeceio.

$$dz = x_{transdutor} \tan \delta p \quad (8)$$

$$dx = dz \tan(\delta p) \quad (9)$$

A Figura B.11 ilustra a questão apresentada.

¹⁵ Deduzidas a partir das equações gerais apresentadas em Wells (2004) e em OHI (2005).

Figura B.11 – Arfagem induzida¹⁶

B.5. Provas de Calibração

As provas de calibração consistem na medição dos desvios da origem de medição do balanço, do cabeceio, da proa e do atraso em tempo do posicionamento relativamente à medição de profundidades.

As provas de calibração devem ser efectuadas a seguir à instalação do sistema SMF, a longos períodos de imobilidade da embarcação de sondagem e sempre que ocorram alterações ou modificações da distribuição de pesos a bordo da embarcação (Artilheiro, 2003). Os valores de calibração devem ser verificados antes e no final da execução de um LH.

As provas de calibração assentam no princípio da repetibilidade, ou seja, partindo do pressuposto de que os valores de sonda devem ser os mesmos, independentemente, da velocidade de sondagem, da orientação da fiada, do ângulo de incidência e das condições ambientais. Assim alguns cuidados são essenciais, tais como:

- Antes das provas é necessária a execução de um perfil VPS, assim como sempre que haja mudança de área
- Durante a execução de qualquer uma das provas de calibração a variação da altura de maré não deve afectar a determinação dos desvios ou da latência num valor superior ao requerido para o LH em causa. Caso isso se verifique, a redução da sondagem é essencial para obter valores de calibração satisfatórios. A melhor forma de minimizar esta questão é efectuar as provas de calibração durante o estofa da maré, ou seja, durante a preia-mar ou durante a baixa-mar
- A condução da embarcação deve ser efectuada por alguém com elevada experiência de modo a manter a proa o mais constante possível e o menor afastamento à fiada planeada
- Condições favoráveis de estado do mar
- Utilização do modo de elevada densidade (mais usual) no algoritmo de formação dos feixes

A determinação dos valores de calibração deve ser efectuada com recurso ao SIS e verificado no HIPS. A utilização de janelas apropriadas na visualização dos dados é fundamental.

A Tabela B.2 apresenta a sequência das provas de calibração para os sistemas da Kongsberg. Esta sequência é ligeiramente diferente da apresentada em OHI (2005) e em Kongsberg (2004). Tendo em

¹⁶ Adaptado de OHI (2005).

consideração que os desvios são dependentes e que o desvio em balanço é o erro que mais afecta as medições (Capítulo B.2) considera-se mais adequado realizá-la duas vezes. Uma no início das provas para a obtenção de um valor aproximado e, outra, no final para afinar o valor previamente determinado.

Tabela B.2 – Sequência e metodologia das provas de calibração

Prova	Largura da faixa sondada	Fiadas
Balanço	130°	Duas fiadas executadas à mesma velocidade, sobrepostas e em sentidos opostos, sobre um fundo plano de profundidade mínima, preferencialmente de 30 m
Latência / Cabeceio	90°	Quatro fiadas sobrepostas, sequencialmente em sentidos opostos, sendo um par ao dobro da velocidade do outro, sobre um declive (pelo menos de 10°) ou sobre um campo de dunas. As fiadas executadas a velocidades diferentes e no mesmo sentido servem para a calibração da latência. As fiadas executadas à mesma velocidade mas de sentidos opostos servem para a calibração do cabeceio
Proa	130°	Duas fiadas executadas à mesma velocidade, paralelas e no mesmo sentido, espaçadas de uma distância de pelo menos 2 vezes a profundidade e garantindo cerca de 20 % de sobreposição e, a detecção de um campo dunar ou de um objecto na zona de sobreposição
Balanço	130°	Duas fiadas executadas à mesma velocidade, sobrepostas e em sentidos opostos, sobre um fundo plano

A Figura B.12 ilustra o modo de execução das fiadas para a determinação do desvio no balanço e, na imagem da direita, o desenho do corredor de observação, transversal às fiadas executadas. A Figura B.13 ilustra a visualização do corredor seleccionado no HIPS, onde com recurso a ferramentas próprias é possível variar o valor de calibração até à sua optimização, ou seja, quando exista sobreposição das faixas sondadas entre fiadas realizadas em sentidos opostos.

As Figuras B.14 a B.17 ilustram o modo de execução e a forma de ajustamento das fiadas de calibração do cabeceio e da proa.

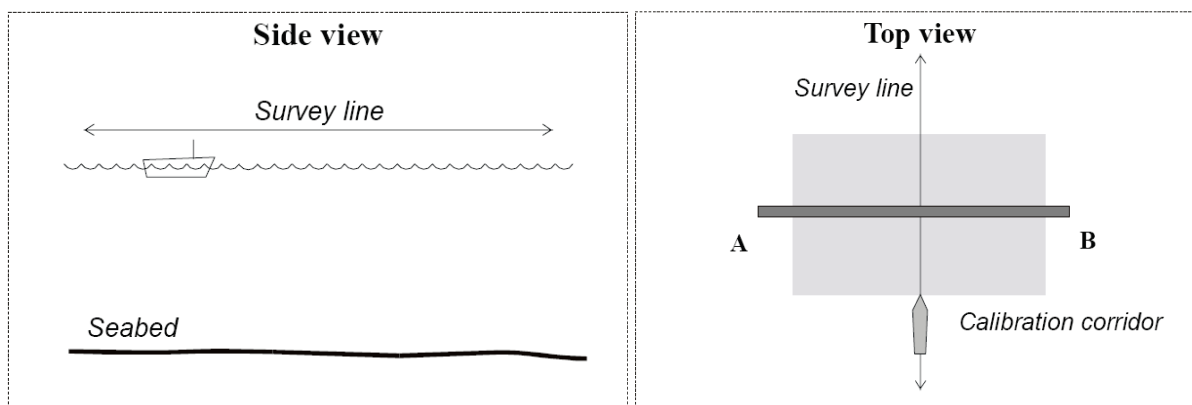


Figura B.12 – Calibração do balanço¹⁷

¹⁷ Fonte: Kongsberg (2010).

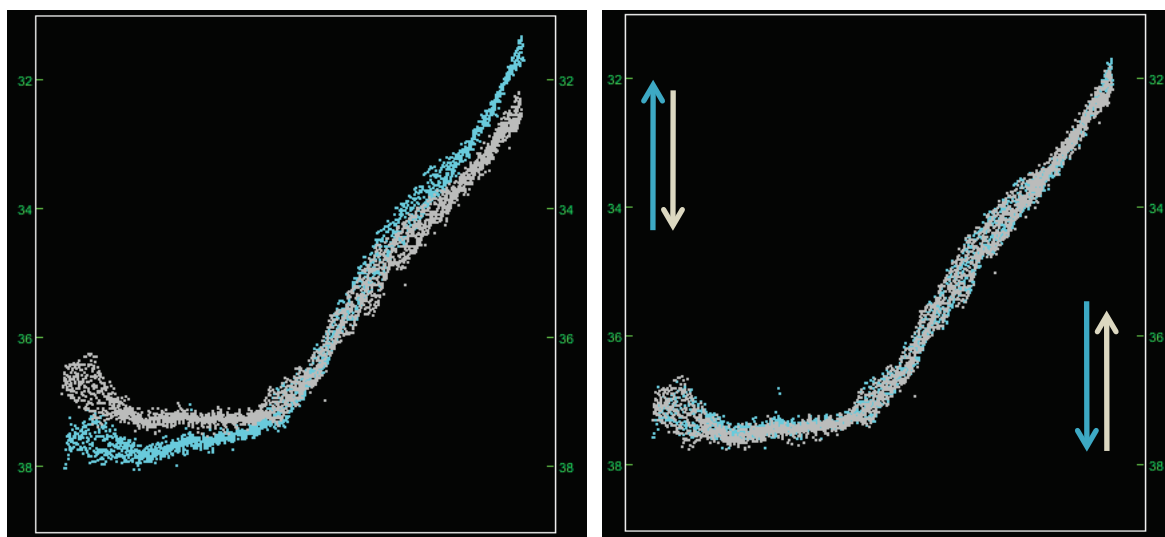


Figura B.13 – Ajustamento das fiadas de calibração do balanço

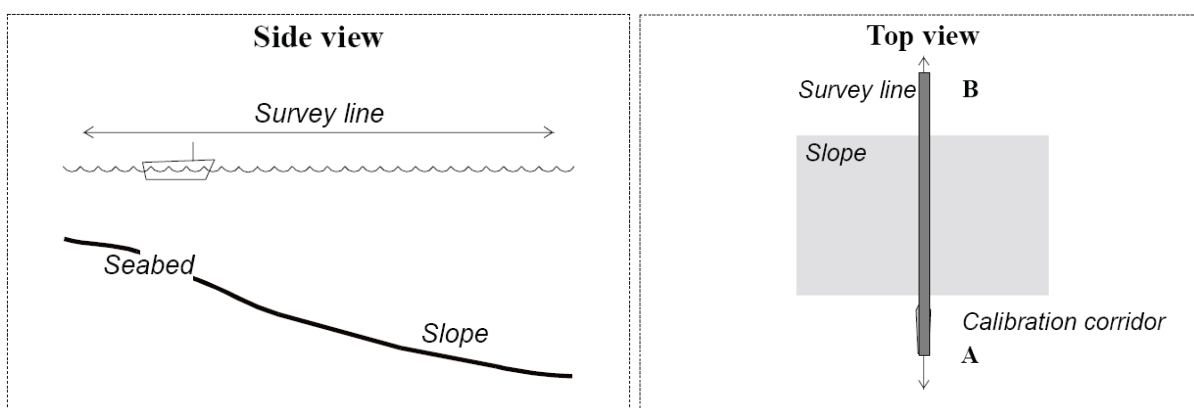


Figura B.14 – Calibração da latência e do cabeceio¹⁸

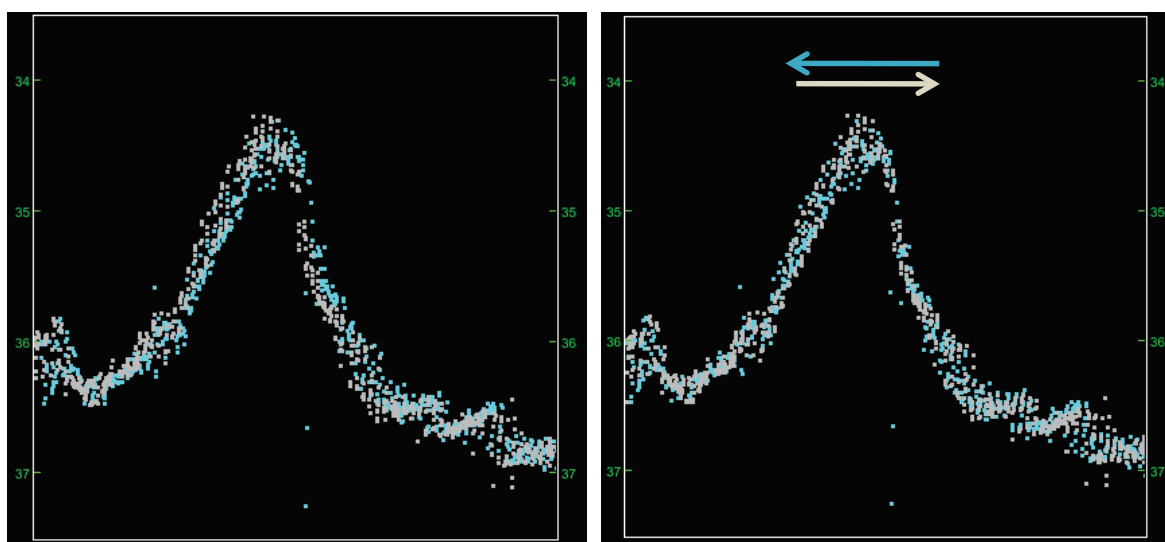


Figura B.15 – Ajustamento das fiadas de calibração do cabeceio

¹⁸ Fonte: Kongsberg (2010).

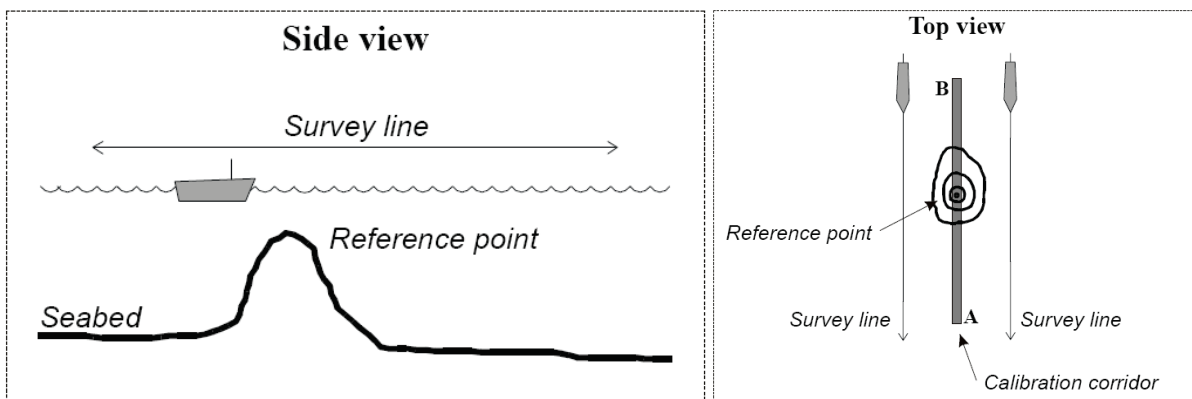


Figura B.16 – Calibração da proa¹⁹

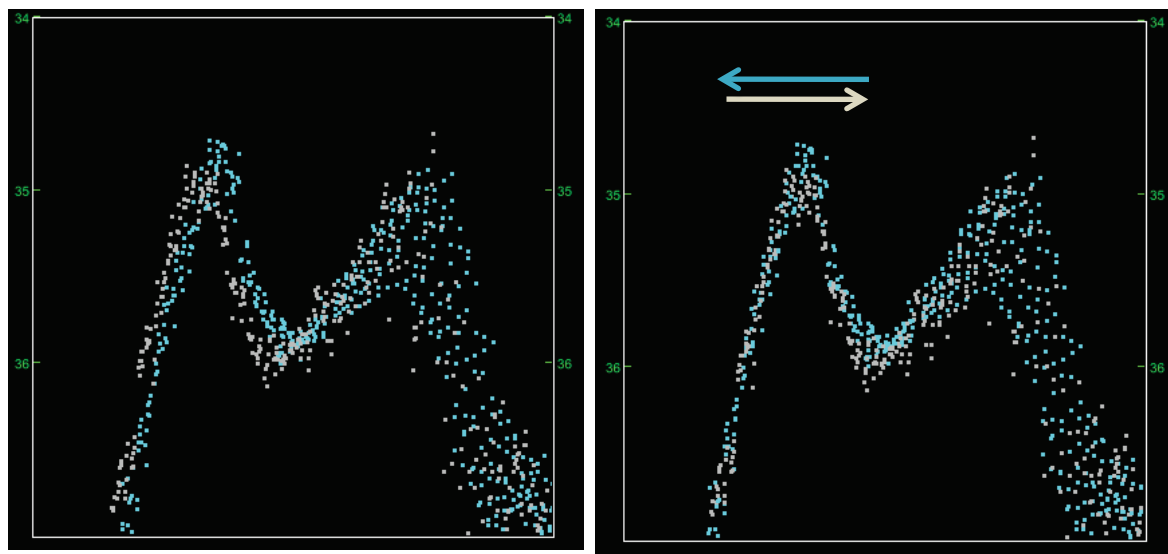


Figura B.17 – Ajustamento das fiadas de calibração da proa

A Figura B.18 ilustra um objecto representado duplamente no MB fruto da não aplicação do desvio em proa.

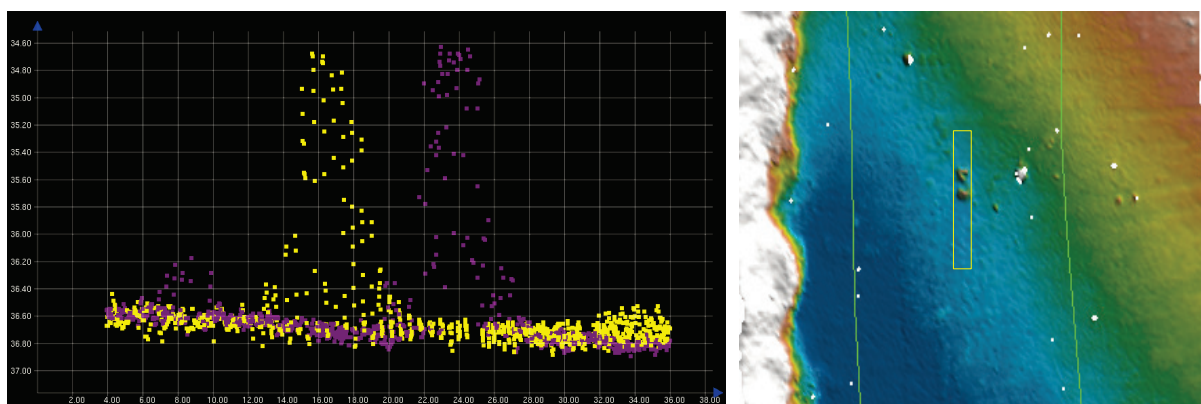


Figura B.18 – Desvio em proa não calibrado

¹⁹ Fonte: Kongsberg (2010).

No SIS é possível determinar de forma automática os valores de calibração seguindo os procedimentos descritos em Kongsberg (2010). Esta metodologia assenta num ajustamento por mínimos quadrados desenvolvida por Bjørke (2005) e explicada em Bjørke (2008).

A prática tem permitido evidenciar o bom desempenho da calibração automática anteriormente referida, no entanto a inspeção visual dos dados é sempre útil nem que seja só para confirmar que todos os procedimentos foram executados correctamente.

B.6. Verificação dos valores de Calibração

Tal como verificado no LH de Setúbal com a quebra de um dos cabos esticadores do suporte do transdutor, por vezes acontecem situações inesperadas que podem condicionar a utilização dos dados previamente adquiridos. Uma forma de minimizar estas situações é planejar as fiadas de sondagem de modo a que em cada sessão de sondagem sejam efectuadas fiadas que cumpram os requisitos das provas de calibração (Tabela B.2). A Figura B.19 exemplifica 3 fiadas de sondagem possíveis de executar e que podem ser utilizadas para verificação dos valores de calibração. A fiada 1 está sobreposta à fiada 2 e são realizadas em sentidos opostos. As fiadas 1 e 3 têm o mesmo sentido e são paralelas de modo a garantir uma sobreposição entre faixas sondadas de cerca de 20%. A análise de um corredor transversal às fiadas 1 e 2 (Figura B.12) nos intervalos das dunas, zonas de fundo mais regular, permite avaliar a correcta aplicação do desvio em balanço. Se visualizarmos as mesmas fiadas longitudinalmente (Figura B.14), ao longo dos feixes centrais e aproveitando o declive das dunas, é possível avaliar a correcta aplicação do desvio em cabeceio. Por fim, analisando um corredor longitudinal ao longo da faixa de sobreposição entre as fiadas 1 e 3 (Figura B.16), é possível avaliar a correcta aplicação do desvio em proa, utilizando para tal a sucessão de cristas dunares.

Convém realçar, que em qualquer análise deste tipo deve ser garantido, entre outros factores, o uso de um perfil actualizado da velocidade de propagação do som, a existência de sincronismo entre sensores e uma adequada redução de maré.

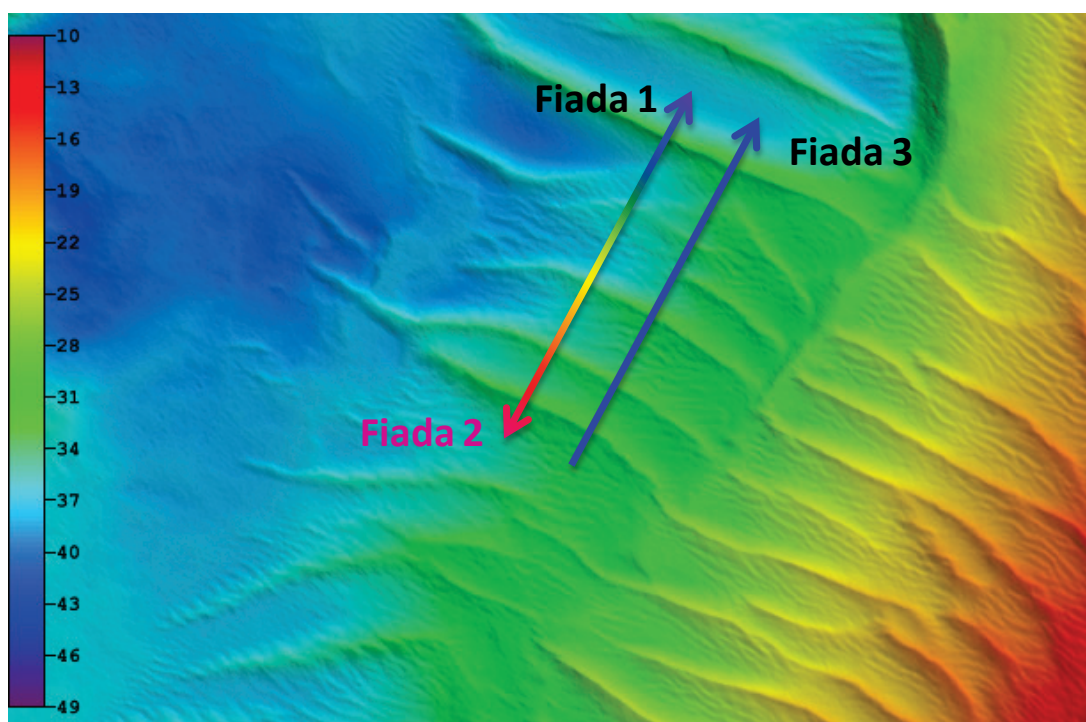


Figura B.19 – Verificação dos valores de calibração

Ao terminar este apêndice e, referenciando a Figura C.18 do Apêndice C, sobre o cruzamento em balanço e cabeceio devido a um erro azimutal de instalação da MRU, propõe-se aos interessados a leitura atenta do texto de Hughes Clarke (2003) que invoca a diversidade dos componentes de um sistema SMF para questionar, a propósito de alinhamentos, o que na realidade se está a alinhar quando se executa um determinado procedimento.

Referências Bibliográficas

Artalheiro, F. (2003): “Apontamentos de Levantamentos Hidrográficos LH 05 – Sondadores Multifeixe”, Escola de Hidrografia e Oceanografia, Instituto Hidrográfico. (Trabalho não publicado).

Bjørke, J.T. (2005): “Computation of calibration parameters for multibeam echo sounders using the least squares method”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 30, No. 4, October 2005, p.818-831.

Bjørke, J.T. (2008): “SeaCal Version 7.0 - User Manual”, Norwegian Defence Research Establishment, Horten.

Hughes Clarke, J. (2003): "A reassessment of vessel coordinate systems: what is it that we are really aligning?", US Hydrographic Conference 2003.

Kongsberg (2004): “EM 3002 - Installation and maintenance manual”, Kongsberg Maritime.

Kongsberg, (2010): “Seafloor Information System - Reference Manual for EM 3002 - Release 3.7”, Kongsberg Maritime.

OHI (2005): “M-13 IHO Manual on Hydrography”, 1ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

OHI, (2008): “S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys”, 5ª Ed., Organização Hidrográfica Internacional.

Wells, D (2004):“ Horizontal, Vertical & Orientation Positioning Requirements 36L13B_PosnReq_ppt_25”, 36th Multibeam Sonar Training Course (Norway), Ocean Mapping Group, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Canada.

Apêndice C

Controlo de Qualidade do LH de Setúbal

Neste apêndice apresentam-se os passos do processamento de dados relativos ao processo de controlo de qualidade do levantamento hidrográfico (LH) tendo em consideração a filosofia de processamento da aplicação CARIS-HIPS (CARIS, 2011) e o fluxograma de processamento de dados apresentado no corpo da dissertação. Uma das tarefas essenciais do controlo de qualidade consiste na identificação de dados afectados de erros. Usualmente, os erros grosseiros são facilmente identificáveis nos modelos batimétricos (MB). Os erros sistemáticos podem ser identificados nos MB caso os dados em análise permitam individualizar a causa e, os erros sejam quantificáveis perante as premissas da modelação. Os erros aleatórios são mais difíceis de identificar nos MB, no entanto, no CUBE, em regra, estes erros acabam por não afectar a estimação da profundidade por não serem espacialmente densos, sendo incluídos em hipóteses alternativas. Outra das análises importantes a efectuar no controlo de qualidade consiste na observação dos critérios de cobertura do LH.

C.1. Características de operação do SMF e valores fixos do modelo de incerteza

Inicialmente é necessário elaborar um ficheiro com as características da embarcação e do sistema sondador multifeixe (SMF) utilizado, designado por *VesselConfig*. Das configurações a utilizar salienta-se a identificação do modelo do SMF utilizado, de modo a que o HIPS possa utilizar essa informação na determinação das incertezas relativas aos braços entre sensores e aos desvios de orientação. Em regra, nos SMF da KONGSBERG estes valores são utilizados na aquisição de dados (Kongsberg, 2005) pelo que nesta fase possuem valores nulos. A Tabela C.1 ilustra as configurações utilizadas no LH de Setúbal. No dia juliano (DJ) 094 de 2011 partiu-se um dos cabos esticadores do suporte do transdutor do SMF. Estes cabos são utilizados para que os movimentos do transdutor sejam idênticos à atitude da embarcação, sendo necessários por, na UAM “Atlanta” (Figura C.1) o transdutor estar instalado na proa. No final do LH foram efectuadas novas provas de calibração e os valores determinados foram utilizados na fase de processamento. Esta opção foi tomada porque no DJ 094, último dia de sondagem, foram executadas apenas fiadas de adensamento na área do Outão.



Figura C.1 - UAM “Atlanta”

São ainda introduzidos os valores fixos¹ associados ao modelo de incerteza utilizado. A Tabela C.2 identifica os parâmetros utilizados no modelo de incerteza. Os valores referidos aos sensores são obtidos nos manuais dos fabricantes. Os valores referidos a braços e desvios de orientação entre sensores são obtidos mediante a incerteza do processo de determinação dos mesmos (Apêndice B).

¹ Caso exista uma sessão de sondagem em que estes valores sejam modificados é mencionada a alteração respectiva através do grupo data-hora, a partir do qual é válida a nova parametrização.

Tabela C.1 – Informação constante no ficheiro de configuração do sistema SMF

VesselConfig:		Atlanta_em3002_setubal2001								
Swath										
Date	Time correction (s)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Pitch (°)	Roll (°)	Yaw (°)	Model		
2010-201	00:00	0	0	0	0	0	0	Simrad EM3002		
2011-094	00:00	0	0	0	0.60	0.32	-0.50	Simrad EM3002		
Navigation					Heave / Roll / Pitch					
Date	Time correction (s)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ellipsoid	Time correction (s)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Apply?
2010-201	00:00	0	0	0	GR80	00:00	0	0	0	No

Tabela C.2 – Dados de incerteza introduzidos no ficheiro de configuração do sistema SMF

TPU:		Atlanta_em3002_setubal2001								
Offsets										
Date	MRU to Trans X (m)	MRU to Trans Y (m)	MRU to Trans Z (m)	Nav to Trans X (m)	Nav to Trans Y (m)	Nav to Trans Z (m)	Trans Roll (°)			
2010-201	-0.15	8.95	2.93	0.06	13.3	7.29	0.5			
StdDev (1 sigma)										
Motion Gyro (°)	Heave % Amp	Heave (m)	Roll (°)	Pitch (°)	Position Nav (m)	Timing Trans (s)	Gyro Timing (s)	Nav Timing (s)	Gyro Timing (s)	Heave Timing (s)
0.05	5	0.05	0.02	0.02	0.5	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01
Pitch Timing (s)	Roll Timing (s)	Offset X (m)	Offset Y (m)	Offset Z (m)	Vessel Speed (m/s)	Loading (m)	Draft (m)	Delta Draft (m)	MRU Align StdDev Gyro (°)	MRU Align StdDev Roll/Pitch (°)
0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.015	0.02	0.02	0.01	0.25	0.1

C.2. Datagramas de navegação, atitude e maré

C.2.1. Navegação

As posições registadas podem, por vezes, estar afectadas de erros como, por exemplo, falhas na recepção das correcções diferenciais (DGPS) ou multitrajeto. Uma forma fácil de detectar situações anómalas é analisar a escala de distância ou de velocidade no editor de navegação (*Navigation Editor*), parametrizando-as para mostrarem o valor mínimo e máximo. A janela de visualização da velocidade indica a velocidade média entre duas posições consecutivas. A janela de visualização da distância indica a distância percorrida entre duas posições consecutivas. A informação de distância e velocidade retrata as acelerações da embarcação quando sujeita a factores externos, como por exemplo, correntes, vento, ondulação e vaga. Assim, um valor anómalo, visível na Figura C.2 e identificado como “salto”, indica uma aceleração anormal, só possível de existir pela gravação de uma posição afectada de erros no posicionamento. Na presença de um valor anómalo único efectua-se uma interpolação entre as posições precedente e sequente. Quando o registo de diversos valores anómalos consecutivos atinge uma dimensão espacial superior à máxima incerteza horizontal permitida então, os dados em causa, devem ser rejeitados (NOAA, 2010a).

No LH de Setúbal foram registados alguns “saltos de posicionamento”, em regra, em fiadas de sondagem que ocorreram junto de estruturas portuárias (Figura C.2) ou que passaram próximo de

navios de grande porte atracados ou fundeados. O intervalo de tempo entre posições de controlo foi de 0,2 s. A velocidade média de sondagem foi de 3,5 m/s. Assim, foi possível registar a posição da embarcação (posições de controlo), ao longo de uma fiada, com um espaçamento médio de 0,7 m. Em profundidades baixas, o intervalo entre a transmissão de impulsos é mais elevado conduzindo à aquisição de faixas espaçadas longitudinalmente, de uma distância inferior à distância entre posições de controlo. Por outro lado, os instantes de gravação de sondas não coincidem com os instantes de gravação de posições de controlo. Dado isto, torna-se necessário efectuar uma interpolação entre posições de controlo de modo a garantir uma posição de referência para cada faixa sondada. Existem vários métodos de interpolação, sendo que, para a taxa de aquisição de posições de controlo referida o método linear seria apropriado (Figura C.3). No entanto, tomando em consideração o “ruído” inerente às correcções diferenciais (Figura C.4) e as situações de multitrajecto (Figura C.2), a opção por uma interpolação pelo método “Tight” é mais indicada, tal como ilustrado na Figura C.3. Esta figura ilustra o resultado das diferentes metodologias de interpolação sobre a posição referenciada como “salto” na Figura C.2.

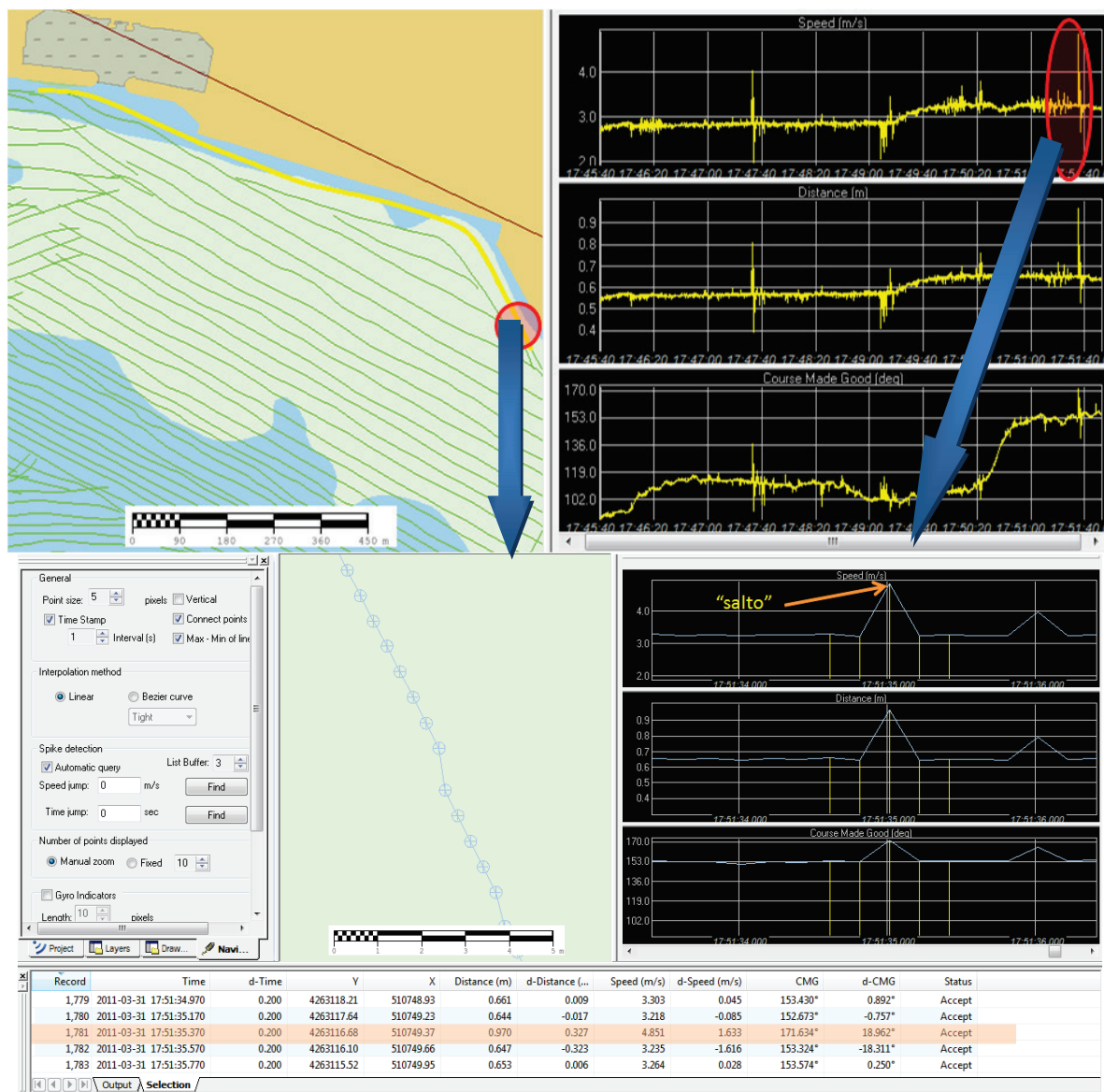


Figura C.2 - Editor de Navegação

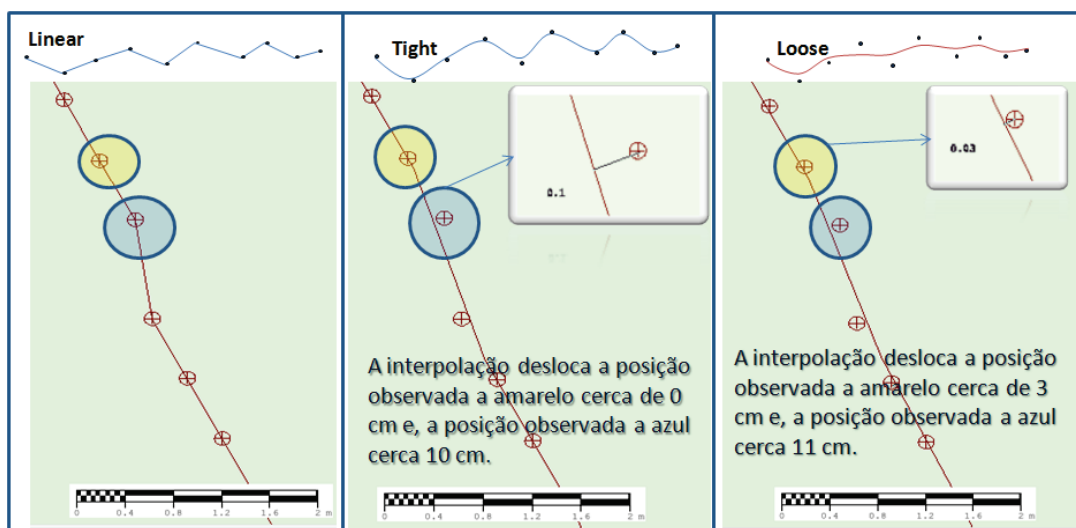


Figura C.3 - Interpolação das posições de controlo

A avaliação da exactidão do sistema de posicionamento DGPS VHF, nomeadamente, a qualidade das correcções diferenciais produzidas pela estação de referência DGPS, foi efectuada colocando a antena do receptor GPS de bordo sobre o ponto BH-IH 28/99 (Instituto Hidrográfico, 2011b). As diferenças foram adquiridas comparando as coordenadas calculadas pelo sistema SMF com as coordenadas conhecidas. A Figura C.4 ilustra as diferenças obtidas para um período de observação de cerca de 25 minutos no dia 2 de Abril de 2011. Os resultados obtidos servem os requisitos de Ordem Especial, cuja incerteza horizontal máxima admissível para todo o sistema SMF é de 2 m. No entanto, importa realçar a existência de algum “ruído” no posicionamento diferencial que se propagará aos MB, nomeadamente, aos de maior resolução, como sejam os MB de 0,5 m de resolução.

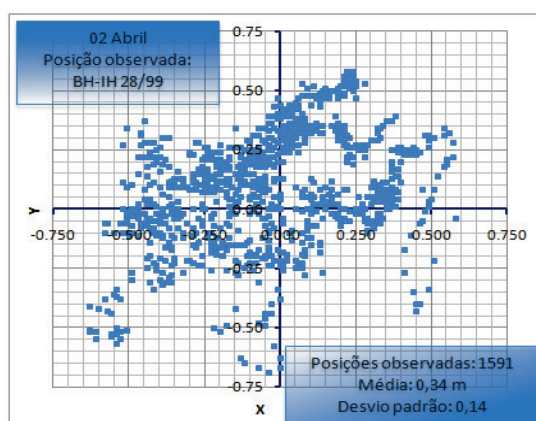


Figura C.4 - Verificação do sistema de posicionamento DGPS

C.2.2. Atitude

Os dados de atitude são gravados a uma taxa de 10 ms e nos sistemas SMF da Kongsberg são utilizados em tempo real, permitindo o guiamento e estabilização dos feixes, assim como, as necessárias correcções às sondas medidas. Assim, a visualização e inspecção dos datagramas de atitude destina-se à identificação e análise de eventuais valores anómalos. Caso existam, devem ser rejeitados. Os valores anómalos mais frequentes acontecem quando o sensor inercial não se

encontra estabilizado ou na presença de estado de mar desfavorável, como ilustrado na Figura C.5. A figura indica ainda a convenção de sinais das diversas componentes da atitude da embarcação utilizada no HIPS. De realçar que esta é diferente da convenção utilizada no sistema de aquisição de dados *Seafloor Information System* (SIS) referida no Apêndice B, sendo os dados transformados durante a conversão de dados do formato Kongsberg para o formato HIPS.

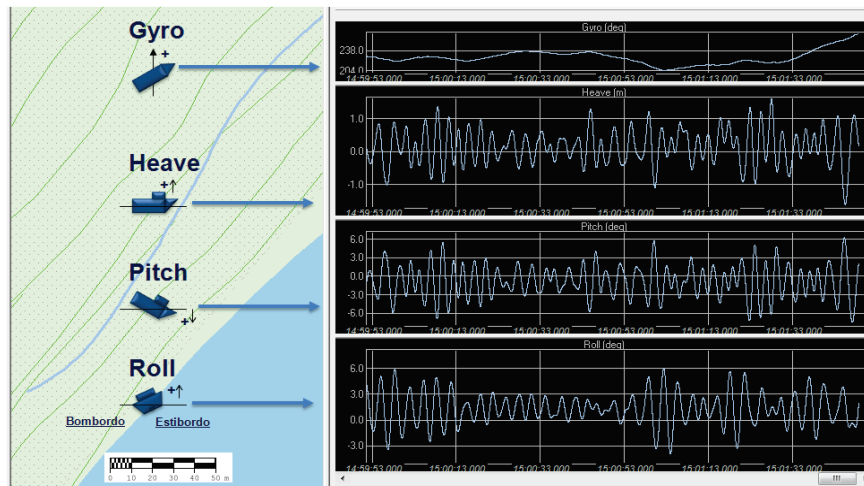


Figura C.5 - Dados de atitude (HIPS)

Quando os valores de atitude são significativos, como os ilustrados na Figura C.5, com máximos de 1,5 m em arfagem (*heave*), 7° em cabeceio (*pitch*) e 6° em balanço (*roll*), é importante efectuar o registo adequado do período temporal a que respeitam os dados e efectuar uma análise mais substancial das sondas observadas. A Figura C.6 ilustra que apesar dos valores significativos de atitude, a informação batimétrica da fiada ilustrada na Figura C.5 é coerente com a informação redundante das fiadas de sondagem adjacentes.



Figura C.6 - Dados de atitude

C.2.3. Maré

Na redução da sondagem foram utilizadas os dados de marégrafos de campanha instalados nas marcas de nivelamento (MN) IH BH 03/11 e IH BH 13/11, leituras à fita nas MN IH BH 28/99, IH BH 10/02, IH BH 18/02, os dados do marégrafo de Tróia e os valores de concordância adaptados da Tabela de Marés (Instituto Hidrográfico, 2011a).

Com base nos dados de maré registados em diversas MN e nos dados do marégrafo de Tróia, aos quais foram aplicados valores de concordância referidos na Tabela de Marés para as diversas áreas do LH (entrada da Barra, Outão e Cais Comercial), foram criadas as respectivas curvas de maré. A estas foi aplicado um polinómio de interpolação de modo a filtrar a agitação marítima e obtidos os valores de maré de 6 em 6 minutos. Criados os diversos ficheiros de maré, foi então aplicado o algoritmo *Tide Zoning* (CARIS, 2011) que permite a obtenção de um valor de maré para a posição da embarcação de sondagem através da interpolação entre várias curvas de maré. Uma ilustração da metodologia é feita na Figura C.7.

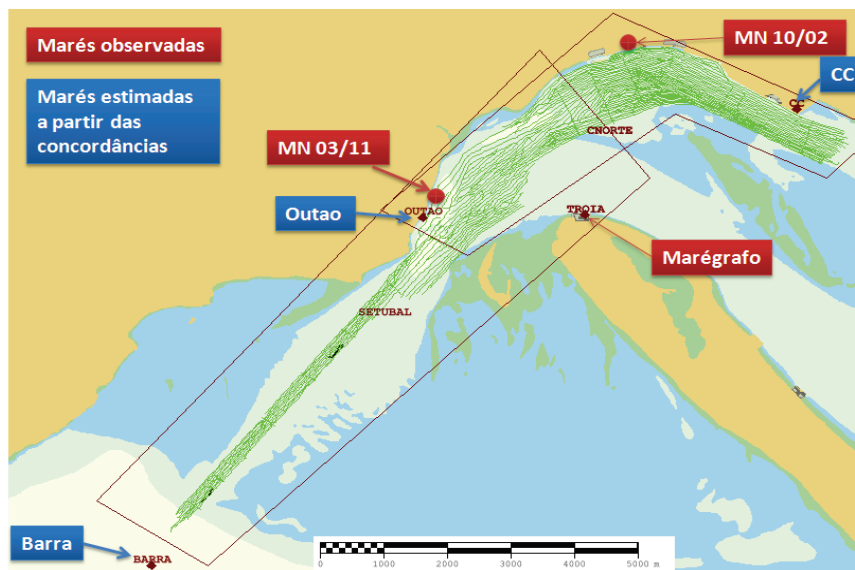


Figura C.7 - Locais de leitura e estimacão de maré

A Figura C.8 ilustra as curvas de maré para os diferentes locais observados no dia 29 de Março de 2011. A figura reforça a necessidade de suavizacão das curvas obtidas pelos marégrafos de Tróia e de Sines, e a importância de modelar as marés para os diversos locais, de modo a minimizar os desfasamentos em fase e amplitude, entre o local de leitura da maré e as áreas sondadas.

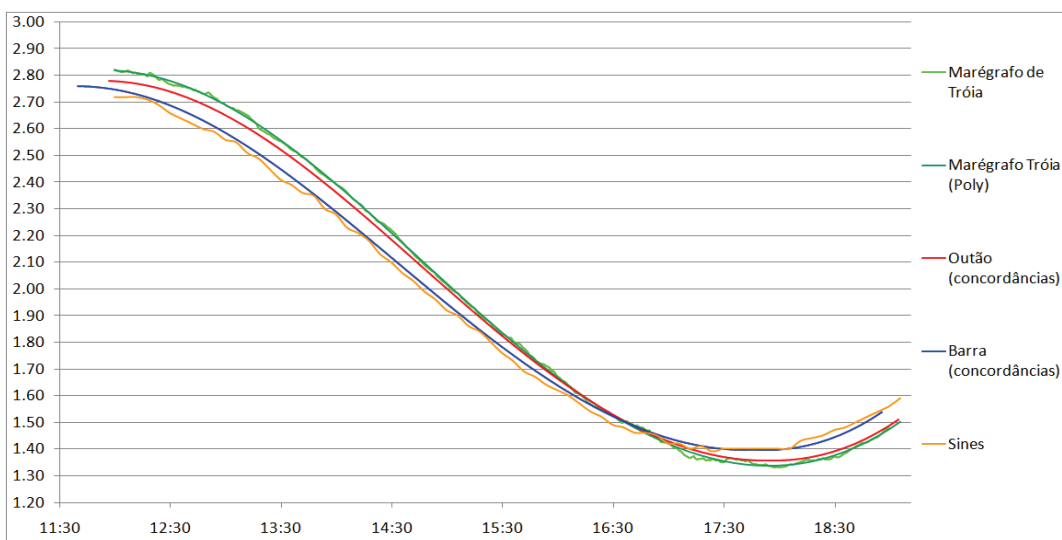


Figura C.8 - Marégramas do dia 29 de Março

C.3. Cálculo das incertezas vertical e horizontal das sondas

Os valores fixos de incerteza (enumerados no Capítulo C.1) são utilizados conjuntamente com os valores variáveis para produzirem os valores totais de incerteza vertical e horizontal de cada sonda. Os valores fixos referem-se a sessões de sondagem, identificadas no ficheiro de configuração do sistema SMF utilizado por um grupo data - hora. Os valores variáveis podem ser referidos a uma única fiada ou a um grupo de fiadas de sondagem e, respeitam às variações temporais e espaciais da VPS na água, assim como, às incertezas na medição da maré e na sua propagação para a posição da embarcação. A Figura C.9 ilustra os valores utilizados na primeira sessão de sondagem do dia 1 de Abril de 2011, com definição dos valores variáveis para as fiadas seleccionadas.

Existem vários filtros que se podem aplicar às sondas por selecção de um conjunto fiadas. No entanto, face à metodologia de processamento adoptada, apenas são rejeitadas as sondas com incerteza superior ao admissível para a ordem do LH.

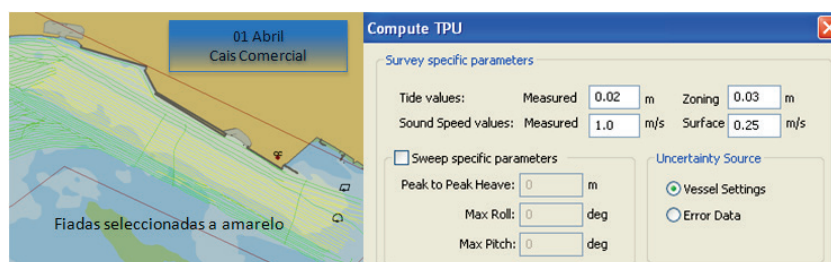


Figura C.9 - Determinação da incerteza

C.4. Junção dos datagramas e geração dos MB CUBE 1

As sondas observadas pelos SMF da Kongsberg são referidas ao Sistema de Coordenadas Local (embarcação), cujo ponto de referência, no caso da UAM “Atlanta”, é o centro de gravidade (CG) da embarcação. A junção dos datagramas consiste na criação de um ficheiro de sondas processadas, no qual, as sondas passam a estar georreferenciadas e reduzidas de maré. Caso existam correcções introduzidas no ficheiro de configuração do sistema SMF serão aplicadas nesta fase.

Estando as sondas georreferenciadas e reduzidas de maré, determinadas as incertezas e rejeitadas as sondas com incerteza, horizontal ou vertical, superior ao valor admissível para a Ordem do LH, estão reunidas as condições para gerar as primeiras superfícies batimétricas. Os MB CUBE 1 (Superfície de aquisição) têm como principal objectivo a análise do cumprimento dos requisitos do LH, nomeadamente, a determinação da incerteza das medições, a análise de cobertura e de busca total do fundo nos LH de Ordem Especial e Ordem 1a e a identificação e análise de erros.

C.5. Erros grosseiros e aleatórios e situações anómalas

Neste estágio de processamento, efectuado durante a execução do LH, os dados afectados de erros grosseiros devem ser rejeitados e os dados anómalos devem ser investigados. Os erros grosseiros são aqueles que possuem uma dimensão grande, como por exemplo uma falha no seguimento do fundo por parte do algoritmo de detecção do fundo do SMF, seja por uma má parametrização do sondador, seja por factores externos, como por exemplo, a existência de bolhas de ar na coluna de água devidas a esteiras de outros navios.

Algumas situações são identificadas como situações anómalas pois a sua classificação na tipologia dos erros não é evidente, como por exemplo, os erros provenientes de multitrajecto do raio sonoro ou pela detecção através de lóbulos secundários. Caso os erros sejam pontuais, consideram-se aleatórios pois dependem da geometria inerente à localização do transdutor, do traçado do raio sonoro e sua interacção com as estruturas existentes no fundo ou na coluna de água. Existem situações do conhecimento do hidrógrafo propícias à aquisição de um número elevado de sondas provenientes de multitrajecto, como por exemplo, em fiadas de sondagem de contorno a cais acostáveis ou nas proximidades de navios de grande calado atracados ou fundeados, ou provenientes da detecção por lóbulos secundários, como por exemplo, em fiadas realizadas sobre taludes acentuados com uma grande diferença de profundidade entre os feixes exteriores dos dois bordos da embarcação. Nestas circunstâncias são considerados erros grosseiros (Mayer, 2004).

Os erros aleatórios estão presentes em todas as observações, pelo que, os resultados dessas observações nunca são exactos. Estes erros são, em regra, de pequena dimensão e, por vezes, são designados por “ruído”, produzindo resultados imperfeitos considerando os objectivos das observações. São exemplos de erros aleatórios os erros associados ao SMF, nomeadamente, o erro inerente ao algoritmo de detecção de fundo, função do método utilizado, observável em maior intensidade na zona de transição da detecção em amplitude para a detecção em fase, uma vez que, esta transição depende do número de amostras de sinal recebido. Não é correcto designar como aleatório um erro no ângulo de incidência dos feixes devida a uma calibração deficiente dos parâmetros dos elementos transdutores, ou a erros no guiamento dos feixes. No entanto, os elementos transdutores podem, com tempo de funcionamento, apresentar limitações operacionais. No caso do SMF utilizado no LH de Setúbal, o transdutor utilizado está em funcionamento há cerca de 10 anos, pelo que apresenta alguns elementos degradados. O resultado prático desta degradação, por enquanto, é de carácter aleatório, pois depende muito da forma como o SMF vai gerindo a utilização dos diversos elementos mediante as incidências do LH (profundidade, razão sinal-ruído, atitude da embarcação, guiamento, etc.). Os erros aleatórios, por norma, não comprometem a modelação efectuada pelo CUBE, pelo que os dados afectados por este tipo de erro não são rejeitados nesta fase, sendo o seu processamento efectuada na fase de Validação dos MB.

A Figura C.10 exemplifica uma má parametrização da janela de profundidade durante a aquisição de dados dando origem a um mau funcionamento do algoritmo de seguimento do fundo do SMF e consequentemente à aquisição de dados anómalos. Nesta figura é possível verificar o elevado desvio padrão nodal. No perfil 2D é possível verificar que, na maioria dos casos, o CUBE na resolução de 1m efectua uma adequada estimação, no entanto existem soluções esporádicas inadequadas pelo que estes dados devem ser rejeitados pelo hidrógrafo.

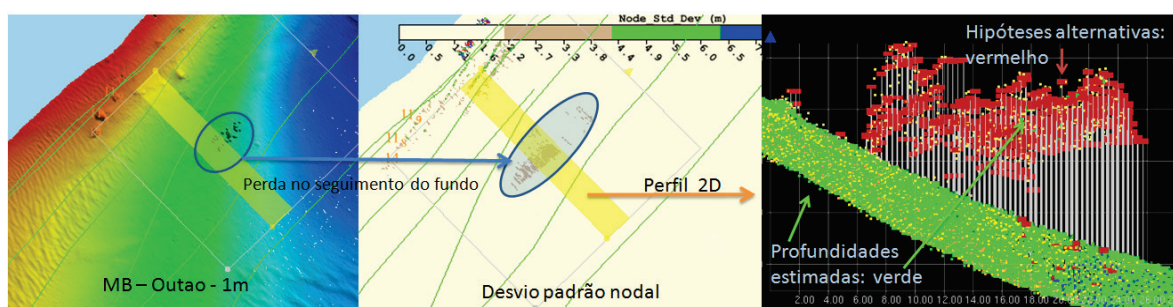


Figura C.10 - Perda no seguimento do fundo

A Figura C.11 ilustra, na imagem da esquerda, uma zona com falha de cobertura. Nestas áreas a densidade de sondas nos nodos de fronteira é muito reduzida, podendo dar origem a estimações estatisticamente fortes mas completamente inadequadas. Uma solução possível seria permitir apenas a estimação de profundidade quando, pelo menos, cinco sondas por nodo fossem

capturadas, tal como exigido pela NOAA. Na imagem da direita da Figura C.11 é visível a aquisição de um conjunto de sondas provenientes de ecos falsos. A rejeição obrigatória destas sondas implica uma falha de cobertura. Na modelação batimétrica para a cartografia náutica importa realçar as especificações dos LH que requerem a busca total do fundo. Assim, um LH pode cumprir os requisitos de incerteza máxima admissível mas a situação ilustrada, caso não exista um adensamento da sondagem sobre o local, é suficiente para afirmar que o LH não cumpre os critérios de busca total do fundo nos LH de Ordem 1a.

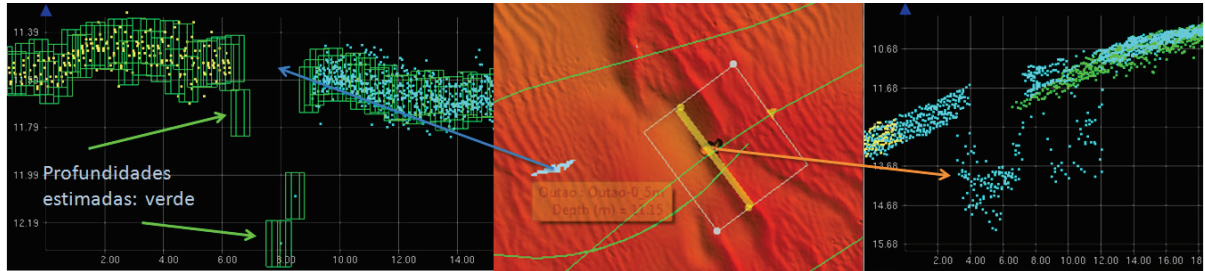


Figura C.11 - Falhas de cobertura e ecos falsos

A Figura C.12 ilustra uma área dragada com fundos irregulares resultantes de operações de dragagem. Os regos dragados atingem cerca de 1,5 m de altura. Verifica-se na análise da imagem uma correcta estimação das profundidades na superfície de resolução de 0,5 m. O “ruído” e os ecos falsos não afectam a estimação da profundidade constituindo-se como hipóteses alternativas.

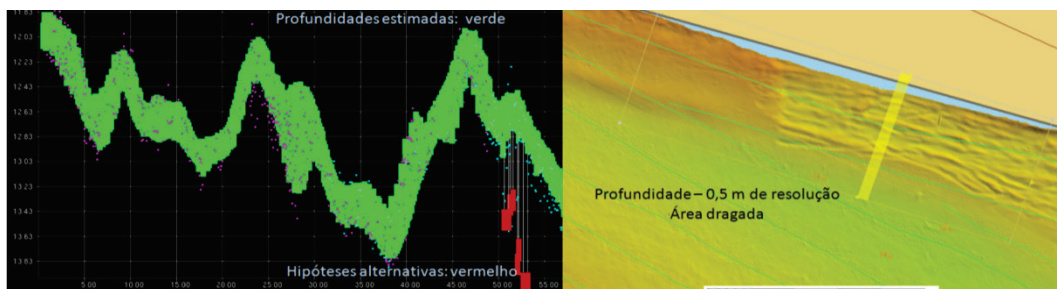


Figura C.12 - MB em fundos irregulares (zona dragada)

O SMF regista maior “ruído” na zona de transição da detecção em amplitude para fase. De uma forma geral, verifica-se na Figura C.13 o bom comportamento do CUBE nesta situação.

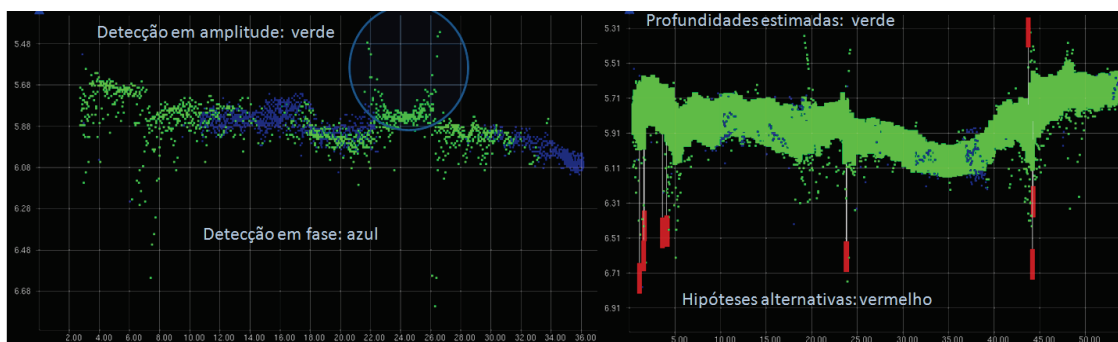


Figura C.13 - Mau funcionamento do algoritmo de determinação da profundidade

Quando se adoptam resoluções mais elevadas, próximas da resolução espacial do SMF, deve verificar-se o resultado da estimação efectuada. A Figura C.14 ilustra a mesma problemática confrontando os MB de resolução de 1 m e de 0,5 m, tornando-se clara a necessidade de edição de dados na resolução de 0,5 m.

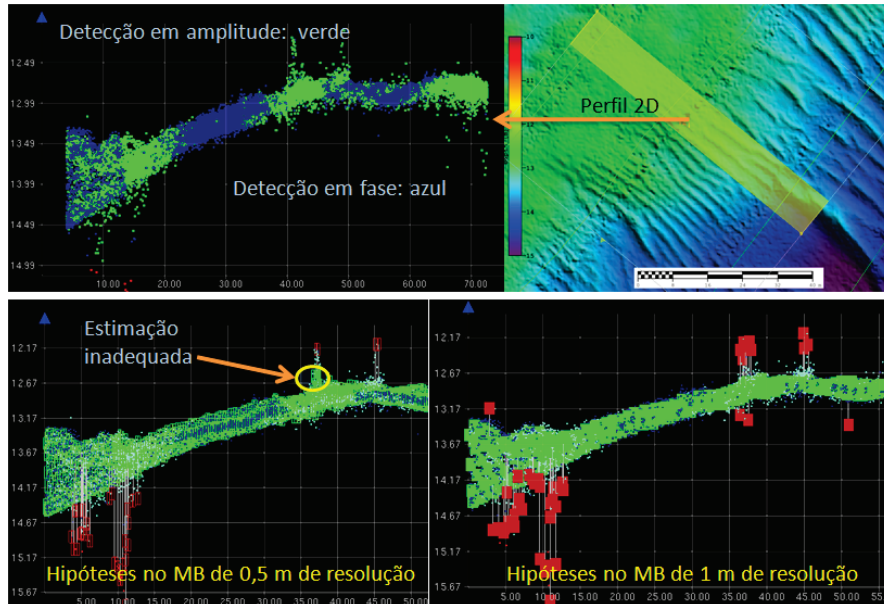


Figura C.14 - Algoritmo de determinação da profundidade versus MB

Nos fundos baixos e em zonas arenosas ou lodosas com imensas partículas em suspensão existe uma tendência natural do SMF para o registo de profundidades anómalas. Esta situação advém do facto de uma parte do sinal ser reflectido pela camada superior de sedimentos em suspensão e, outra parte, penetrar na camada sedimentar e só depois ser reflectido. A agravar esta situação há o facto de no percurso do sinal, ao longo desta camada sedimentar em suspensão, não ser possível determinar o traçado do raio sonoro. Esta situação está directamente associada aos fenómenos de turbulência e induzem a medições de profundidades anómalas. Como se referiu, esta situação tem maior predominância em fundos pouco profundos, sendo visível na Figura C.15 o elevado ruído provocado. No entanto, é possível observar uma boa estimação da profundidade por parte do CUBE, mesmo na resolução mais elevada.

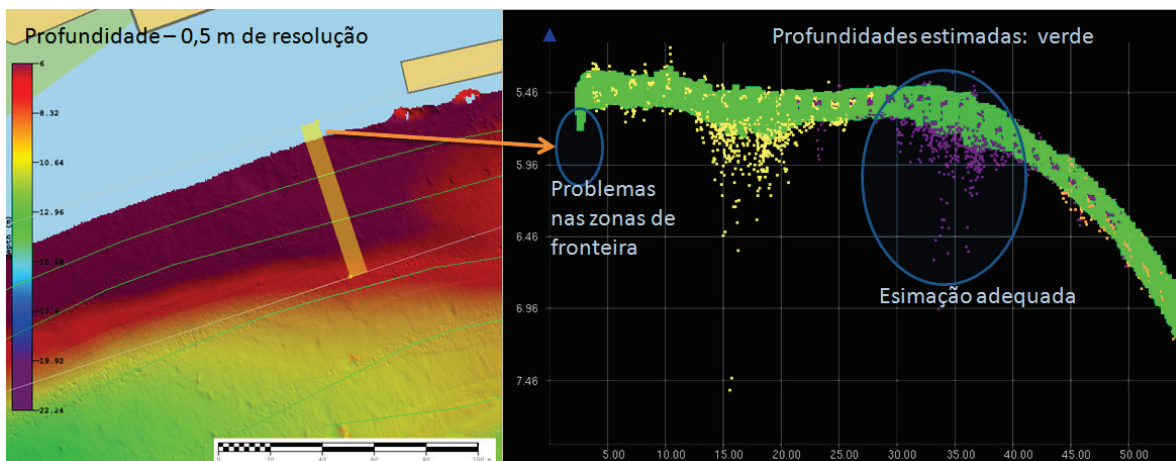


Figura C.15 - Situações de ruído elevado

Por fim, um último exemplo, relacionado com a possibilidade de multitrajecto, situação propícia de suceder em zonas com variações súbitas do fundo, como as adjacentes a cais acostáveis. Estas situações produzem estimações de profundidade anómalas que requerem por si só, uma análise cuidada. Em regra são rejeitados todos os dados sem interesse para a segurança da navegação, ou seja, aqueles que se localizam na, e para lá da, vertical do cais acostável. A Figura C.16 ilustra esta situação, sendo facilmente observáveis os dados a rejeitar.

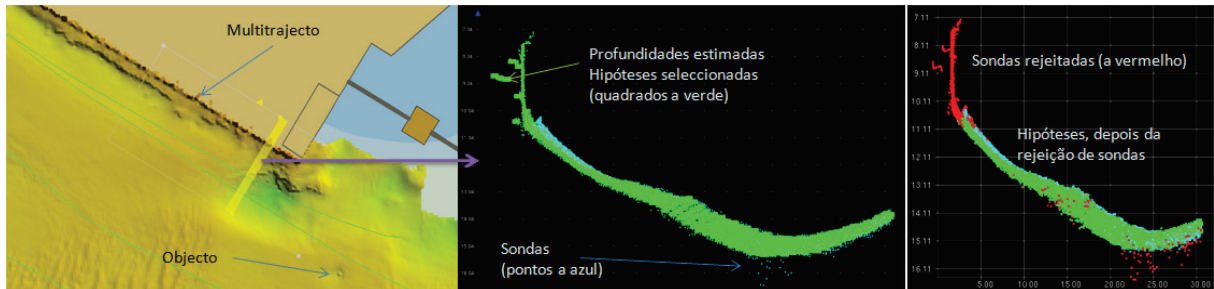


Figura C.16 - Zonas acostáveis (multitrajecto)

C.6. Erros sistemáticos

De acordo com OHI (2005), os erros sistemáticos podem ser definidos por uma função matemática e, normalmente, podem ser constantes, periódicos, proporcionais ou de dimensão variável mas são possíveis de eliminar e/ou minimizar através de procedimentos específicos.

Após a instalação do sistema SMF, é necessário efectuar a medição dos diferentes braços e desvios do transdutor, do sensor de movimentos e da antena do sistema de posicionamento relativamente ao ponto de origem do referencial da embarcação. No SMF EM 3002, a integração dos dados de atitude é efectuada activamente, uma vez que é efectuada a estabilização dos feixes de transmissão e/ou recepção. Existem situações em que o conhecimento dos braços e, sobretudo, dos desvios não é possível de efectuar com o nível de exactidão necessário aos LH. Na UAM “ATLANTA” a instalação utilizada não é fixa, o que não garante a sua imutabilidade temporal ao nível dos desvios de orientação. Nesta embarcação o transdutor é instalado na proa. De modo a manter os movimentos do transdutor em conformidade com os movimentos da embarcação existe uma coluna de instalação fixa e dois cabos esticadores, um de cada bordo, cuja regulação tem que ser efectuada em cada instalação que se faça. Assim, de modo a efectivar a correcta determinação dos desvios de orientação são efectuadas provas de calibração. Estas, consistem na medição dos desvios da origem de medição do balanço, do cabeceio, da proa e do atraso em tempo do posicionamento relativamente à medição de profundidades. Os valores determinados são introduzidos na aplicação de aquisição de dados, de modo a serem aplicados no cálculo das coordenadas referidas ao transdutor para cada feixe. A metodologia utilizada na execução das provas de calibração foi apresentada no Apêndice B. A Tabela C.3 resume os erros constantes possíveis de minimizar pela execução de provas de calibração.

No penúltimo dia de trabalhos de campo, um dos cabos esticadores partiu-se sem que a equipa hidrográfica se apercebesse. Tal como constatado no LH de Setúbal, é boa prática que sejam efectuadas, de forma frequente, provas de calibração expeditas, ou seja, o planeamento e execução de fiadas adicionais que permitam verificar os desvios de orientação. Felizmente, foi esta a situação que ocorreu, permitindo a correcção dos dados em pós-processamento, tal como indicado no Capítulo C.1.

Tabela C.3 – Erros constantes minimizáveis através de provas de calibração

Erro	Consequência
Desvio na medição do balanço	Erro na medição da profundidade e no posicionamento das sondas. Aumenta com a profundidade e com o aumento do ângulo de incidência.
Desvio na medição do cabeceio	Erro menos significativo que o do balanço na medição da profundidade e no posicionamento das sondas. Aumenta com a profundidade e com o aumento de declive do fundo.
Desvio entre a medição da proa e o alinhamento do transdutor	Erro no posicionamento das sondas. Aumenta com o aumento do ângulo de incidência.
Latência do posicionamento relativamente à medição de profundidade	Erro no posicionamento das sondas. Aumenta com a velocidade da embarcação.

Dos erros sistemáticos constantes apenas se falou dos desvios de orientação e da latência do posicionamento relativamente à medição da profundidade. São ainda erros constantes, qualquer indicação incorrecta dos braços entre sensores (antena GPS, *motion reference unit* - MRU e transdutor) em qualquer um dos eixos, X, Y ou Z, assim como, a indicação em Z da localização da linha de água relativamente ao CG. A linha de água refere-se ao plano horizontal da superfície da água que intersecta a embarcação, sendo necessária para referir a profundidade medida pelo transdutor à linha de água instantânea.

No caso da UAM “ATLANTA”, os valores de braços e da linha de água referidos já foram alvo de diversas medições, apresentando uma elevada consistência, pelo que se assume a inexistência de erros a este nível, traduzindo-se unicamente na incerteza das medições efectuadas.

Para além dos erros constantes, existem outros que vão variando com o tempo, com maior ou menor velocidade. O erro no calado propaga-se directamente como erro de medição da profundidade. A variação do deslocamento da embarcação devido ao consumo de água e de combustível, sendo usualmente linear, entre reabastecimentos, traduz-se no erro do calado. O assentamento (*settlement*) é o aumento do calado de uma embarcação a navegar, relativamente ao seu calado em repouso. Este efeito é mais visível em águas pouco profundas e deve-se à redução da pressão da água junto às obras vivas do navio. O efeito contrário, menos frequente, é possível também de observar, ou seja, a diminuição do calado com o deslocamento fruto da tendência da força de impulsão tender a elevar o navio, fenómeno conhecido por *lift*. A variação dinâmica do caimento (*squat*) é outro dos efeitos que ocorre em condições dinâmicas. Em regra, com o aumento de velocidade existe uma tendência natural das embarcações para elevarem a proa da embarcação, alterando o plano horizontal da mesma. A água do mar e dos rios não possui a mesma densidade, pelo que pode existir ainda um erro devido à variação da densidade da água. O efeito é o mesmo da variação de deslocamento.

Após diversas medições, provas e análises efectuadas no IH, no caso da UAM “ATLANTA”, uma embarcação muito estável com cerca de 15 m de comprimento e 1,5 m de calado, este último conjunto de erros não afecta, em condições normais de operação, as diversas medições numa quantidade superior às próprias incertezas das medições referidas na Tabela C.2.

Dois dos erros mais frequentes prendem-se com acelerações súbitas da embarcação que alteram, temporariamente, o plano horizontal de referência da MRU, ou com a utilização de uma frequência de corte do período máximo da ondulação inadequada no sensor de movimentos.

No primeiro caso, deve-se garantir a estabilização da MRU após as guinadas de mudança de fiada ou alterações bruscas no governo da embarcação. Nestes casos, a vertical aparente do conjunto de acelerómetros da MRU não corresponde à orientação da força da gravidade local (Figura C.17).

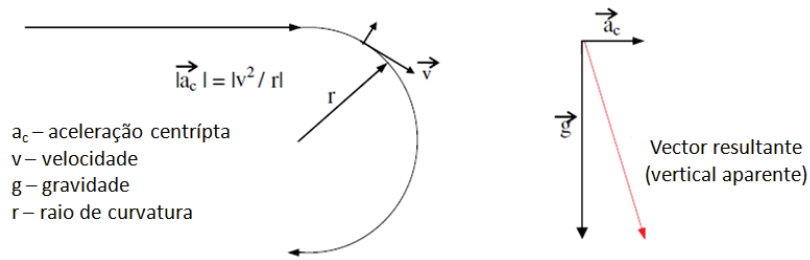


Figura C.17 - Efeito da aceleração horizontal durante a rotação da embarcação²

Por outro lado, a utilização de uma frequência de corte do período máximo da ondulação menor que o seu valor real provocará medições erradas. Mais uma vez, o hidrógrafo tem de garantir que esta situação não sucede. Por vezes não é fácil garantir este facto, nomeadamente, quando as fiadas têm a mesma orientação que a direcção da ondulação, situação que aumenta o período aparente da ondulação quando a embarcação navega com o mar na popa, e que diminui o período aparente da ondulação quando a embarcação navega com o mar na proa. A questão fundamental é parametrizar a frequência de corte de modo a permitir o registo da ondulação com maior período aparente.

Através de uma análise cuidada dos dados do LH e dos MB é possível avaliar se os dados estão afectados de erros sistemáticos. O problema sucede quando existe mais do que um erro sistemático. As observações podem ser dependentes e não ser possível individualizar as situações descritas. A título de exemplo, de acordo com Kongsberg (2005) e ilustrado na Figura C.18, um desvio de 1° em proa da MRU resulta num erro em balanço de 0.09° se a embarcação de sondagem cabecear 5°.

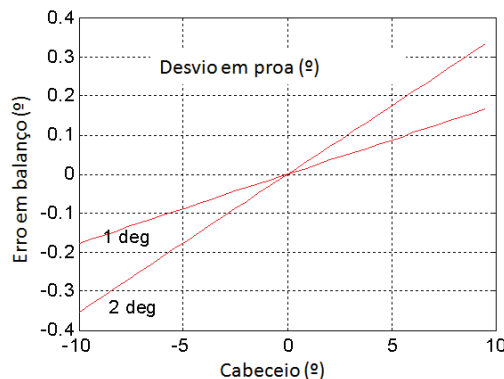


Figura C.18 - Cruzamento em balanço e cabeceio devido a um erro azimutal de instalação da URV³

Para além do estudo adequado para a determinação de todos os braços entre sensores, assim como, dos desvios nas medições das diversas componentes de atitude, é necessária uma estratégia de planeamento do LH que permita garantir um contínuo conhecimento dos parâmetros de instalação e de calibração do sistema SMF.

Os erros constantes ilustrados na Tabela C.3 são minimizáveis através de provas de calibração, no entanto, surge uma questão pertinente: onde aplicar as correcções, nas aplicações de aquisição de dados ou no processamento. O mesmo se passa com os braços entre sensores ou as latências ou deficiências de sincronismo. Relativamente aos SMF da Kongsberg só existe uma forma adequada de os aplicar, tal como relatado na secção 2.3 do corpo da dissertação. A razão mais evidente para que

² Adaptado de Artilheiro (2003).

³ Adaptado de Kongsberg (2005).

sejam aplicadas correcções na aquisição de dados prende-se com a necessidade do SMF ter de conhecer adequadamente aquela informação para fazer um correcto guiamento dos feixes. Recorde-se que o guiamento dos feixes é necessário para a estabilização e para a formação dos feixes na recepção. No caso dos SMF Kongsberg EM 3002, se os desvios de orientação fossem aplicados na fase de processamento no HIPS os seguintes erros não seriam corrigidos: erros devidos a uma inadequada estabilização em cabeceio e em balanço e, erro devido à arfagem induzida, pelo facto da localização da MRU ser diferente da localização do transdutor do SMF.

Por vezes, algumas correcções podem ser aplicadas ou ignoradas no processamento, desde que o resultado dessas acções não comprometa os requisitos e objectivos do LH. A utilização de pequenas correcções ou de ajustamentos finos nos desvios de orientação no processamento de dados necessita, tal como a calibração do SMF, de fiadas de sondagem realizadas para esse efeito. De salientar o facto de estas fiadas terem ser efectuadas em situações comparáveis, devendo evitar-se, por exemplo, zonas de forte dinâmica sedimentar devida às correntes de maré.

Como referido anteriormente, no DJ 094 um dos cabos esticadores do suporte do transdutor do SMF quebrou sem que a equipa de sondagem tivesse notado. Este facto produziu alterações nos desvios de orientação, com necessidade de aplicar correcções aos dados em pós-processamento visíveis na Tabela C.1. O facto de as correcções terem sido aplicadas em pós-processamento permitiu a utilização dos dados adquiridos dentro dos requisitos do LH, Ordem 1b. Para realçar a necessidade de aplicar os desvios de orientação foram examinadas três fiadas numa subárea do Outao.

- Fiada 24 e fiada 25, adquiridas no dia 31 de Março de 2011, efectuadas em sentidos diferentes e com os valores de calibração dos desvios devidamente calculados
- Fiada 204, adquirida no dia 4 de Abril de 2011, executada com valores de calibração não corrigidos pelo motivo da quebra do cabo esticador do suporte do transdutor, efectuada no mesmo sentido da fiada 25

A Figura C.19 ilustra as profundidades do MB de 1 m de resolução e a camada de informação de desvio padrão nodal. Um aspecto curioso nas imagens é de no MB apenas se notarem artefactos e um elevado desvio padrão na zona de sobreposição entre as faixas sondadas pelas fiadas 25 e 204. Este facto deve-se à conjugação dos diversos desvios de orientação e à morfologia do fundo, associadas à proa da embarcação utilizada na aquisição de dados, salientando-se o maior impacto sobre as dunas, em virtude do erro de posicionamento das sondas obtidas sobre as dunas devido ao desvio entre a medição da proa e o alinhamento do transdutor (fiadas no mesmo sentido). No outro bordo da fiada 204, na zona sobreposta à fiada 24 e apesar do erro de posicionamento referido, o desvio padrão é menor face a uma atenuação de efeitos opostos provocados pelos vários desvios existentes (proa e cabeceio). O Apêndice B explica a metodologia de calibração e refere o formulário adjacente aos efeitos de desvios de orientação.

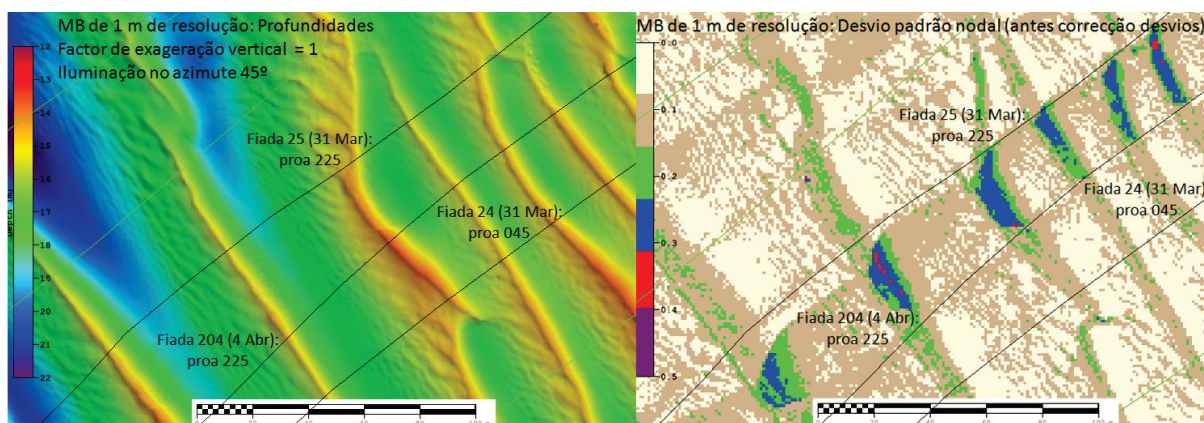


Figura C.19 - Profundidade e desvio padrão nodal (antes da correcção dos desvios)

A Figura C.20 ilustra os efeitos de alterar a exageração vertical bem como o azimute de iluminação, de modo a evidenciar os artefactos criados pelos desvios de orientação.

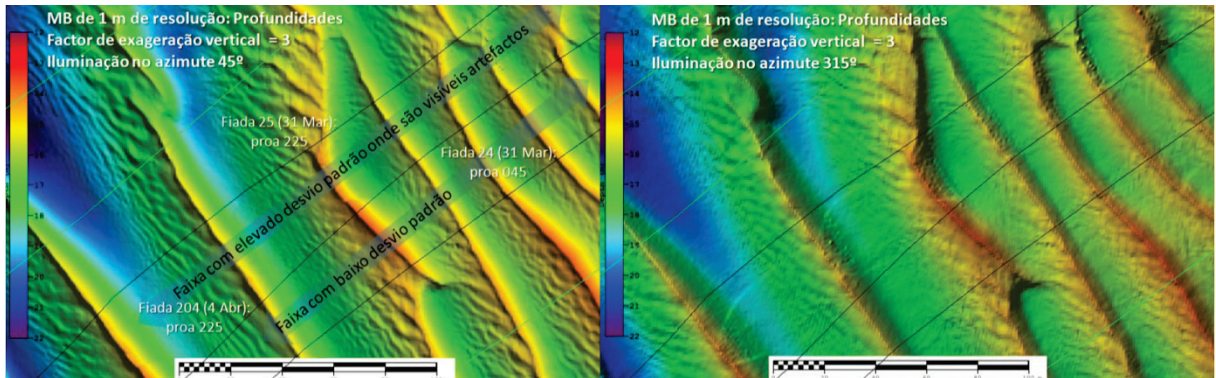


Figura C.20 - Visualização de dados de profundidade (exageração vertical e iluminação)

A Figura C.21 ilustra o Número de Hipóteses e a Confiança nas Hipóteses, realçando a área de maior descontinuidade das medições. Ilustra ainda, na janela de visualização 2D, a fiada 25 (roxo) e a fiada 204 (cinza) com diferenças de posicionamento na ordem de 1 m (crítica nos MB de 0,5 e 1 m de resolução) e diferenças na medição de profundidade na ordem de 40 cm (crítica para os requisitos de LH de Ordem 1), justificando a necessidade de correcção dos dados.



Figura C.21 - Número e Confiança nas Hipóteses e, visualização 2D

Após a determinação dos novos desvios, os valores de correcção foram aplicados e os MB refeitos. A Figura C.22 ilustra as profundidades do MB depois da correcção dos desvios, verificando-se uma diminuição dos artefactos e uma redução clara do desvio padrão para valores inferiores a 20 cm.

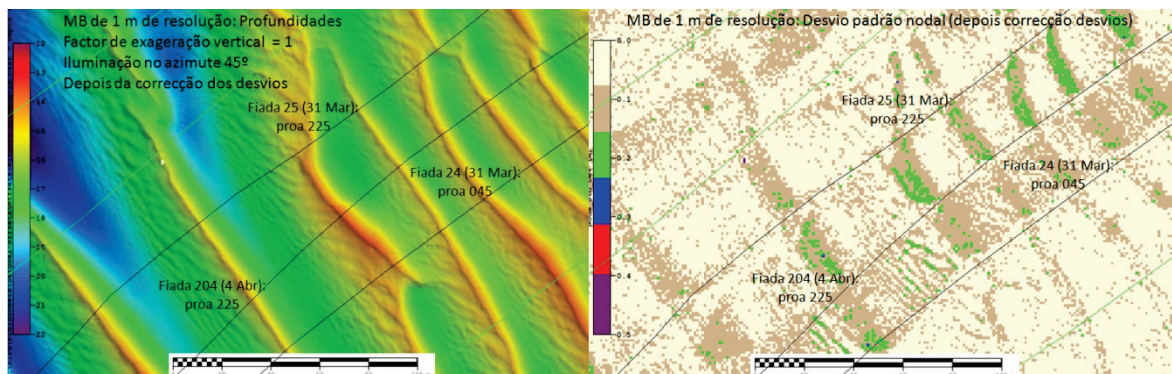


Figura C.22 - Profundidade e desvio padrão nodal (depois da correcção dos desvios)

A Figura C.23 ilustra o impacte da correcção dos desvios de orientação nas camadas de informação Número de Hipóteses e Confiança nas Hipóteses, comparativamente com a Figura C.21.

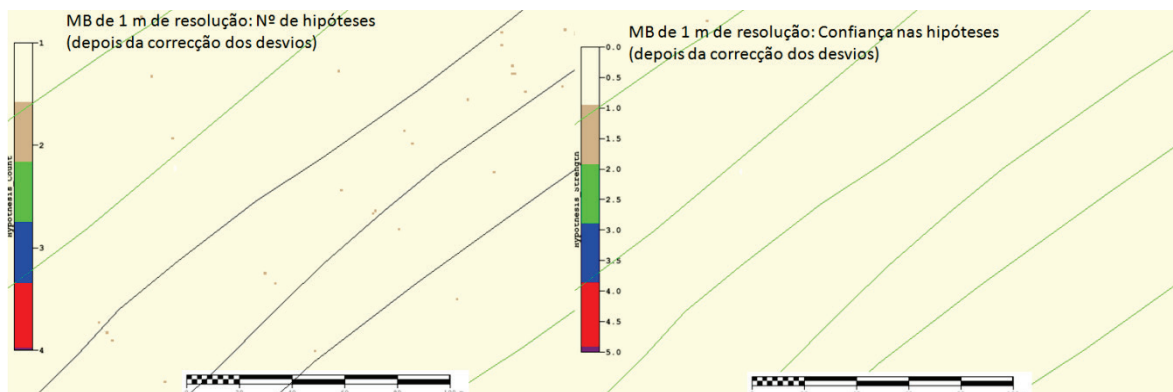


Figura C.23 - Número e Confiança nas Hipóteses (depois da correcção dos desvios)

Observando em maior detalhe a informação contida no MB depois de aplicadas as correcções, verifica-se um valor residual de 10 a 20 cm entre a informação da fiada 204 e a informação das fiadas 24 e 25. Como se referiu anteriormente, o facto de se aplicarem as correcções aos desvios no processamento dos dados minimiza alguns erros mas não os elimina na totalidade. Mantêm-se dois erros residuais mais significativos, ou seja, os erros devidos a uma inadequada estabilização em cabeceio e em balanço e o erro devido à arfagem induzida, pelo facto da localização da MRU ser diferente da localização do transdutor do SMF. Seria ainda possível minimizar o erro na medição da arfagem induzida. Para tal seria necessário efectuar um artifício por os dados adquiridos já virem corrigidos dos braços e desvios entre sensores, bem como, da informação resultante da atitude da embarcação. Tal artifício consistia em determinar a maior componente vertical do erro, ou seja, a devida ao desvio em cabeceio e aplicá-la ao braço entre o sensor de movimentos e a MRU. O resultado é utilizado directamente como uma correcção na medição da profundidade (em Z) na linha *swath* da Tabela C.1. No Apêndice B foi demonstrado que esse valor seria de 0,10 m. Este valor não foi utilizado, uma vez que, por um lado, com as correcções aplicadas aos desvios de orientação os dados passaram a cumprir os requisitos de Ordem 1b, por outro lado, a não aplicação da correcção em Z devida à arfagem assegura profundidades menores, garantindo a segurança da navegação.

C.7. Erro na VPS

Um erro na velocidade de propagação do som (VPS) ao longo da coluna de água é um caso especial de um erro sistemático, incluído normalmente na categoria dos erros proporcionais, dado existir um aumento do erro com o ângulo de incidência. Contudo, podem existir contributos constantes de erros na medição, tais como uma deficiente calibração do sensor de pressão, ou contributos aleatórios, nomeadamente, quando se efectuam sondagens sobre zonas onde existam camadas de turbulência, para as quais se desconhece a variação da VPS.

O SMF utiliza algoritmos de formação dos feixes para a detecção do sinal recebido em diferentes ângulos de incidência (OHI, 2005). O conhecimento da VPS é essencial para o guiamento dos feixes e para a determinação da sonda e sua localização, sendo necessário para tal o conhecimento da VPS à face dos transdutores e ao longo da coluna de água, respectivamente. No LH de Setúbal foram utilizados velocímetros para obtenção das duas componentes descritas:

- VPS à face dos transdutores obtida em tempo real a uma taxa de 1 Hz, utilizada no guiamento dos feixes, e medida por um equipamento designado por PROBE

- VPS ao longo da coluna de água, medida por um perfilador acústico, designado por SVP, cujo perfil obtido é utilizado para o traçado do raio sonoro e para a solução do problema de refração

A variação da VPS à face do transdutor introduz um erro no ângulo do feixe que, por seu lado, também se traduz num erro na profundidade medida e no seu posicionamento (OHI, 2005). Qualquer erro na VPS à face do transdutor propagar-se-á como erro no ângulo do feixe (OHI, 2005). Nos SMF da Kongsberg o guiamento dos feixes é efectuado em tempo real (Hammerstad, 1998). Para a estabilização do feixe é necessário introduzir atrasos em tempo nos elementos transdutores do agregado. Para calcular os atrasos é necessário conhecer a VPS à face dos transdutores. Utilizando um velocímetro à face do transdutor a incerteza no guiamento traduz-se na própria incerteza do equipamento quando devidamente calibrado.

Por outro lado, a VPS afecta directamente a medição das sondas e a sua localização. Os erros na VPS são, na prática, difíceis de quantificar e os problemas devido às variações temporais e espaciais podem ser tão significativas que a solução pode passar por limitar a cobertura angular efectiva do sondador. Assim, é imperioso um estudo adequado da circulação das massas de água e dos factores que afectam alterações da estrutura da VPS na área a sondar. A VPS na água é condicionada pela temperatura, salinidade e pressão. Alguns dos factores são o aquecimento solar diurno (afecta a camada superficial), pluviosidade em excesso, e a corrente de maré, nomeadamente, em zonas fluviais. É essencial um adequado planeamento da periodicidade e do local para efectuar o perfil da VPS de modo a obter uma amostra representativa da estrutura das massas de água existente na área do LH para a sessão de sondagem.

O conhecimento do comportamento do perfil de VPS é fundamental para determinação da periodicidade e da distribuição espacial dos perfis na área a sondar, de modo a minimizar o impacto de possíveis alterações da estrutura da coluna de água. No LH de Setúbal, por ser uma barra e porto estuarino muito afectada pelas correntes de maré e tomando em consideração lições aprendidas de trabalhos anteriores, foram executados diversos perfis ao longo da área a sondar. À medida que se foi obtendo um conhecimento mais adequado da VPS ao longo da coluna de água, a periodicidade dos perfis estabilizou. No caso nos LH nas barras fluviais, é ainda boa prática efectuar um perfil da VPS na zona mais exterior da barra, caso seja efectuado com a maré a encher, e outro numa área mais interior, caso seja efectuado na vazante, o que permite aumentar o tempo de validade do perfil observado.

Os erros provocados pela utilização de um perfil inadequado são fáceis de identificar em fundos regulares, traduzindo-se, numa linguagem comum aos hidrógrafos, num perfil “sorridente” (quando a VPS real é maior que a utilizada no perfil) ou “tristonho” (quando a VPS real é menor que a utilizada no perfil), tal como exemplificado na Figura C.24. Normalmente, os erros têm menor expressão nos feixes centrais e aumentam consideravelmente a partir dos feixes com ângulos de incidência superiores a 45°, pelo que normalmente, são integrados nos erros sistemáticos proporcionais.

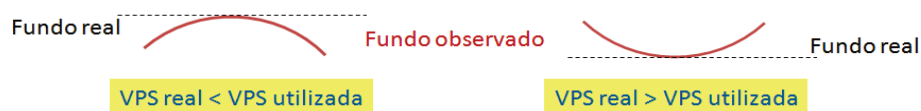


Figura C.24 - Erros induzidos pela refração da VPS

Uma forma possível de avaliar a incerteza na localização e medição das profundidades devida a potenciais alterações da VPS ao longo da coluna de água consiste na execução de uma fiada de verificação numa zona de fundo regular, na mesma área e imediatamente após a realização de um perfil. Seguidamente, e admitindo que a fiada de verificação não está afectada de outros erros, é possível comparar a informação daquela fiada com as fiadas de sondagem entretanto efectuadas,

com particular incidência para os feixes exteriores destas últimas. Um elevado desvio-padrão nos nodos gerados sobre os feixes exteriores de uma fiada de sondagem é evidência de uma possível alteração da estrutura da coluna de água. Similarmente, é possível efectuar o mesmo raciocínio nas zonas de sobreposição entre faixas sondadas, tal como ilustrado na Figura C.25.

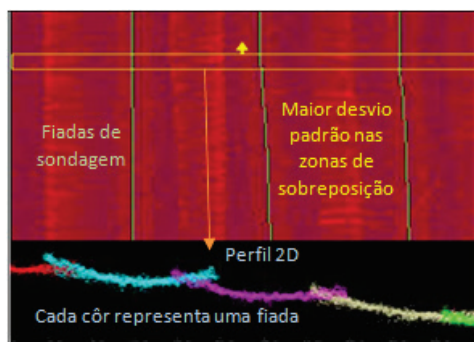


Figura C.25 - Desvio padrão nodal em fiadas com erros na VPS⁴

No LH de Setúbal, face às condições ambientais registadas durante as sessões de sondagem e tendo em consideração a época do ano, o factor mais significativo na alteração da VPS ao longo da coluna é a diferença salina entre a água doce quando flui para o mar durante a vazante ou quando a água salgada flui para o interior do porto na enchente, mas de uma forma geral, apenas existem fluxos horizontais de água. De uma forma geral a camada de mistura prolongou-se até ao fundo causando uma termoclina insignificativa. As variações observadas entre perfis foram inferiores a 1 m/s, o que não afecta os requisitos de incerteza máxima admissível do LH.

C.8. Erro na Maré

A maré é outro exemplo especial de um erro sistemático. Podem existir contributos grosseiros ou aleatórios na determinação da curva de maré. Face à metodologia utilizada no LH de Setúbal, são de realçar os desfasamentos em fase e em altura existentes entre os locais de leitura de maré e as posições sondadas pela embarcação. Este erro, em regra, pode incluir-se nos erros sistemáticos proporcionais porque, normalmente, existe uma relação entre os dois locais (função da distância, assumindo que as condições ambientais são as mesmas nos dois locais). O HIPS permite o zonamento da maré através da interpolação de leituras de maré de diversas estações para a posição da embarcação de sondagem. Uma forma de analisar a existência de erros na modelação da onda de maré, em fase e/ou em amplitude, é comparar os dados recolhidos com uma fiada de verificação, nomeadamente, os dados referentes aos feixes centrais, menos susceptíveis a erros provenientes de um deficiente traçado do raio sonoro, com os dados recolhidos nas fiadas de sondagem. Para tal foi seleccionada uma fiada de sondagem executada quase no estofa da preia-mar, na zona mais a jusante da barra do porto de Setúbal. Esta fiada foi executada no dia 30 de Março de 2011 às 11h25m. As fiadas de sondagem foram executadas nos dias 29 e 30 de Março de 2011, sendo que, no dia 29 foram executadas duas fiadas entre as 13h27m e as 14h15m e, no dia 30, 7 fiadas entre as 09h26m e as 11h25m. A fiada de verificação foi efectuada no final da última sessão de sondagem. A Figura C.26 ilustra as fiadas em causa e as curvas de maré possíveis de utilizar. A curva designada por Tróia indica a maré lida no marégrafo de Tróia e a curva designada por Barra corresponde à maré utilizada a partir da aplicação ponderada das concordâncias existentes na Tabela de Marés (Instituto Hidrográfico, 2011a). Por norma, as curvas indicam cerca de 10 cm de desfasamento em altura de maré, sendo menor nos estofos da maré.

⁴ Imagem adaptada de NOAA (2010b).

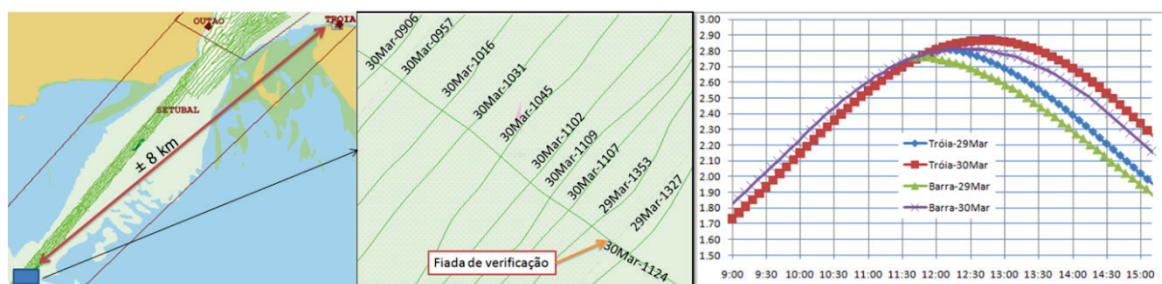


Figura C.26 - Área exterior da barra e curvas de maré de 29 e 30 de Março

Efectuando a modelação batimétrica da área ilustrada na Figura C.26 considerando as duas curvas de maré, conclui-se da necessidade de aplicar as concordâncias observando o desvio padrão nodal ilustrado na Figura C.27. Nas imagens da esquerda da Figura C.27, a redução de maré foi efectuada através da aplicação directa das curvas de maré obtidas no marégrafo de Tróia. Evidenciam-se as zonas assinaladas com as letras A, B, C e D. As zonas A, C e D foram sondadas em períodos distintos de maré, referindo-se um desfasamento na redução de maré na ordem dos 10 cm. A zona D é particular pois evidencia o mesmo desfasamento entre faixas sondadas durante as fiadas principais de sondagem em dias diferentes. A Zona B evidencia um baixo desvio padrão nodal pelo facto de as fiadas principais de sondagem e a fiada de verificação terem sido efectuadas consecutivamente, num período em que a maré se aproximava do seu estofe e logo, o desfasamento em amplitude ser menor. As imagens da direita da Figura C.27 mostram as mesmas fiadas mas aplicando as concordâncias de maré, o que minimiza os desfasamentos em amplitude e fase. A faixa visualizada no perfil 2D deve estar localizada sobre os feixes centrais da fiada de verificação, minimizando deste modo possíveis erros da VPS.

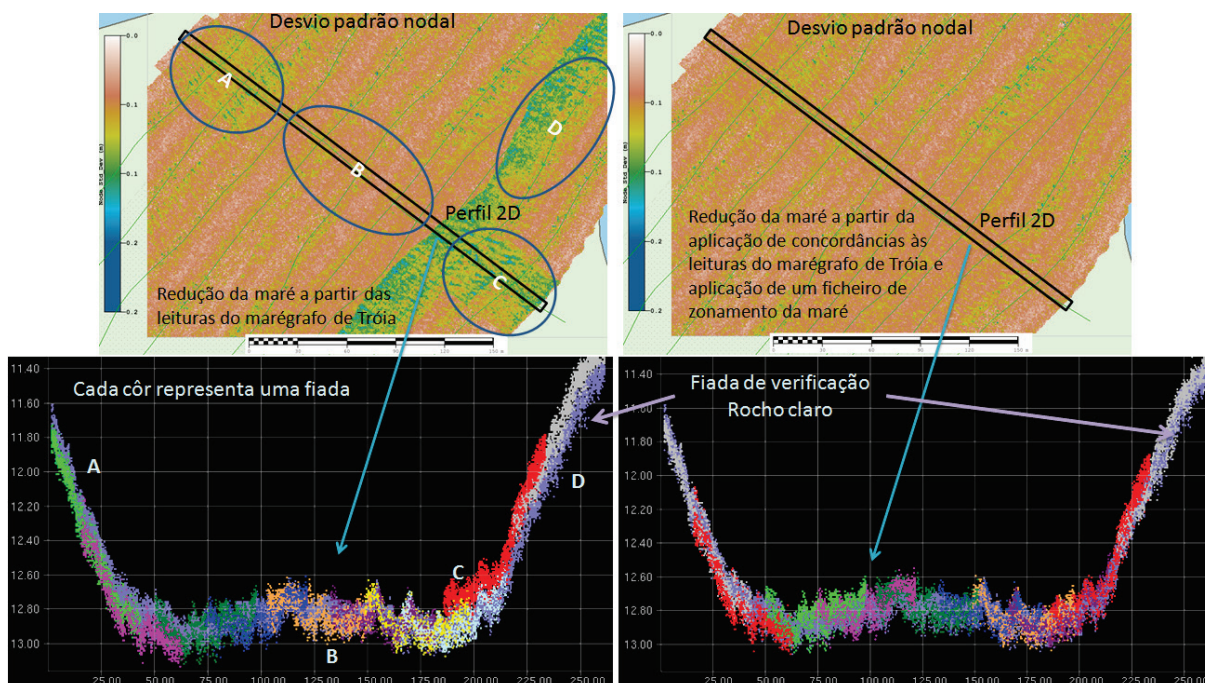


Figura C.27 - Comparação das metodologias de redução da maré

C.9. Comparação dos MB com as fiadas de verificação

Uma das formas utilizadas e previstas em OHI (2005) e Instituto Hidrográfico (2008a) para o controlo de qualidade dos LH consiste na comparação das sondas adquiridas nas fiadas principais de sondagem com as sondas adquiridas em fiadas de verificação. Instituto Hidrográfico (2008a) refere que num LH devem ser efectuadas fiadas perpendiculares às fiadas principais de sondagem, para verificação do posicionamento, da medição das profundidades e da medição das alturas de maré. De salientar que existem erros que não são possíveis de avaliar com base nesta metodologia, como por exemplo, a imersão do transdutor que afecta de igual modo as medições de profundidade em ambas as fiadas.

Instituto Hidrográfico (2008a) refere o espaçamento entre as fiadas de verificação, entre 10 a 20 vezes o espaçamento das fiadas principais de sondagem, nos LH executados com SMF. No entanto, nada refere sobre a metodologia a utilizar para a comparação. Em regra, os dados adquiridos nas fiadas principais de sondagem são modulados permitindo a geração de MB e, com estes comparadas as fiadas de verificação. No caso do HIPS esta avaliação é efectuada com a ferramenta QC-REPORT (CARIS, 2011). Uma questão surge de imediato, qual a resolução mais adequada para os MB? A resposta prende-se ao facto de estarmos a comparar as sondas das fiadas de verificação com MB gerados a partir das sondas adquiridas nas fiadas de sondagem. A resposta mais imediata seria que a comparação só é possível se os MB possuírem uma resolução espacial próxima da resolução espacial dos próprios SMF utilizados na aquisição de dados. Sabemos no entanto que a MB nestas condições não é consistente, tal como referido por Rice e Calder (2009). Assim, a opção seguinte e, na opinião do autor, mais coerente, é utilizar a melhor resolução possível, que no LH de Setúbal, correspondente aos MB para detecção de objectos, uma vez que esta, gera uma superfície menos suavizada. No entanto, como é visível pela observação dos resultados nas Tabelas C.4 e C.5, as diferenças não são significativas. Estas tabelas ilustram os resultados da comparação entre os MB gerados para a Barra, Outão e Comercial, isentos de erros grosseiros, e as fiadas de verificação, igualmente, isentas de erros grosseiros. Nas tabelas a coluna MAX e MIN indicam a máxima diferença encontrada das sondas localizadas acima e abaixo dos MB, respectivamente. Um valor médio positivo indica que as sondas, em média estão acima dos MB. O valor de desvio padrão das diferenças é apresentado a um nível de confiança de 68%. As colunas Ordem Especial e Ordem 1a, indicam a percentagem de comparações cuja diferença é inferior às máximas incertezas admissíveis para LH daquelas Ordens.

Na avaliação da integridade da medição das sondas através dos resultados expressos nas Tabelas C.4 e C.5, quer utilizando os MB de Detecção de Objectos quer utilizando os MB de Cobertura Completa, os dados adquiridos estão dentro das tolerâncias definidas pela OHI (2008).

Tabela C.4 – Comparação das fiadas de verificação com os MB de Detecção de Objectos

	Profundidade (m)	N.º Comparações	MAX (m)	MIN (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)
1-DO-Barra-0_5m	0 – 20	1596139	0,75	1,284	0,012	0,081	99,246	99,979
1-DO-Outao-0_5m	0 – 20	1315467	0,554	0,886	0,026	0,066	99,972	99,999
1-DO-Outao-1m	18 - ...	809998	0,943	0,96	0,009	0,094	99,337	99,985
1-DO-Comercial-0_5m	0 – 20	4400039	0,621	1,197	0,018	0,059	99,916	99,999
Total de comparações		8121643					99,736	99,994

Tabela C.5 – Comparação das fiadas de verificação com os MB de Cobertura Completa

	Profundidade (m)	N.º Comparações	MAX (m)	MIN (m)	Média (m)	Desvio padrão (m)	Ordem Especial (%)	Ordem 1a (%)
1-CC-Barra-1m	0 – 20	1599298	0,978	0,678	0,013	0,083	99,14	99,947
1-CC-Outao-1m	0 – 20	1316228	0,51	0,559	0,027	0,065	99,984	100
1-CC-Outao-2m	18 - ...	811152	1,379	1,384	0,009	0,114	98,224	99,782
1-CC-Comercial-1m	0 – 20	4400578	0,645	0,685	0,019	0,058	99,902	99,998
Total de comparações		8127256					99,598	99,967

C.10. Análise de Cobertura

A cobertura efectiva é determinada com base nos dados considerados válidos após a execução do controlo de qualidade. Da cobertura efectiva não faz parte a informação rejeitada anteriormente, razão pela qual deve ser analisada sobre os MB CUBE 2 (ou seja, os MB CUBE 1 recalculados).

A análise de cobertura do LH de Setúbal envolve dois aspectos, por um lado, nas áreas Barra e Comercial é necessário garantir a busca total do fundo (LH de Ordem 1a), e por outro lado, é necessário garantir a representatividade de objectos, obstruções ou outras estruturas relevantes para navegação nos MB. Os requisitos de Ordem 1a requerem a detecção de todos os objectos com aresta superior a 2 m. Quer a análise da cobertura efectiva nas áreas Barra e Comercial quer a representatividade de objectos foi mencionada no corpo da dissertação. Convém referir que a densidade de sondas é função do MB requerido. A Figura C.28 ilustra diferentes densidades de sondas em função da resolução dos MB e da profundidade. No MB de 0,5 m de resolução observa-se a existência de nodos sem informação nas profundidades superiores a 30 m, verificando-se que aquela resolução é inadequada para estas profundidades. A análise de cobertura deve ser efectuada apenas sobre a gama de profundidades que importam a um determinado MB.

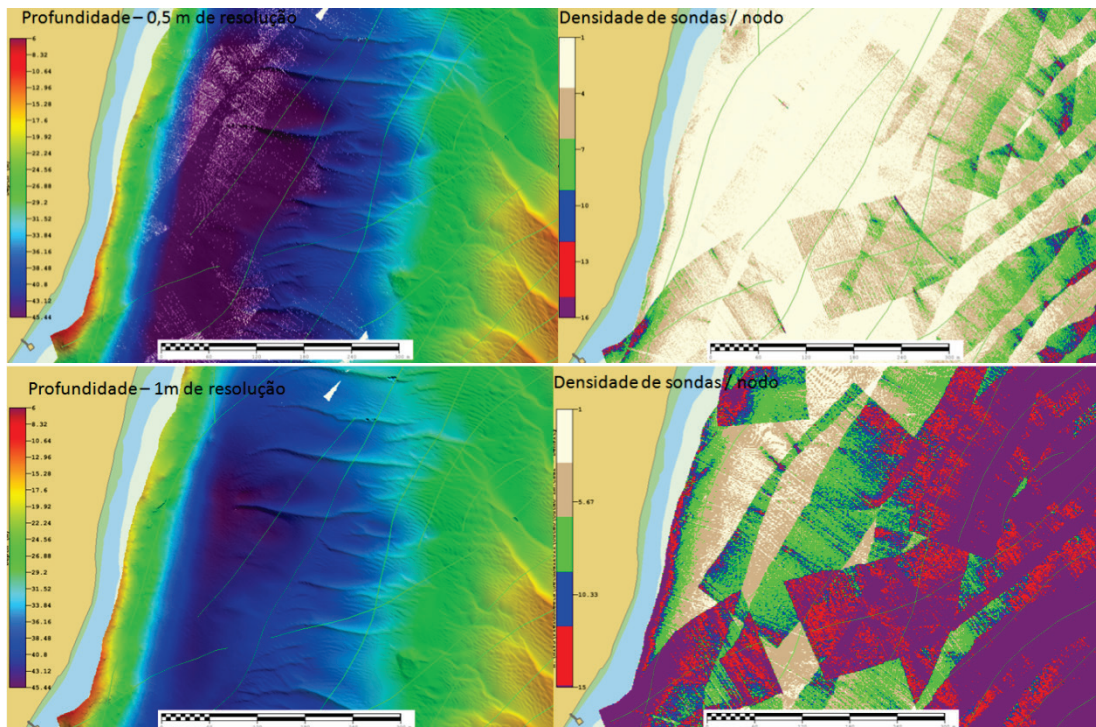


Figura C.28 - Densidade de sondas versus MB (subárea Outao ao Albarquel)

NOAA (2010b) estabelece que 95% dos nodos da superfície devem estar povoados com pelo menos 5 sondas. Até às profundidades de 30 m não devem existir na superfície mais do que 3 nodos adjacentes sem informação (*holidays*), e ainda, não podem existir nodos sem informação localizados sobre estruturas relevantes.

Observando a informação das Tabelas C.6 e C.7 realça-se a elevada percentagem de nodos povoados com sondas e a baixa percentagem de nodos nos MB 2-DO-Barra-1m e 2-CC-Barra-2m que satisfazem os critérios definidos para a Ordem Especial. Os MB referidos localizam-se na entrada da barra numa zona de grande variabilidade do fundo onde predomina um talude acentuado.

Qualquer que seja o MB é conveniente, tal como afirmado por Rice e Calder (2009), que este possua uma densidade mínima de 5 sondas por nodo. A informação sobre o número de nodos povoados não permite discriminar os nodos com aquela densidade mínima, facto este já relatado à CARIS. Na Tabela C.8 á avaliada a densidade mínima de nodos requerida pela NOAA, ou seja, pelo menos 95% dos nodos povoados com pelo menos 5 sondas.

Tabela C.6 – Resultados da BASE QCReport sobre a CUBE 2 (MBDO)

		Modelos Batimétricos de Detecção de Objectos		
		2-DO-Barra-0_5m	2-DO-Barra-1m	2-DO-Comercial-0_5m
Intervalo de profundidade (m)		0 – 20	18 - ...	0 – 20
N.º de nodos existente no MB		5092547	54904	13639284
N.º de nodos povoados		5092350 (≈100.00%)	54855 (99.91%)	13627459 (99.91%)
N.º de <i>holidays</i> detectados		19	6	81
Ordem especial	N.º de nodos considerados	5092350	32686	13627026
	Nodos que satisfazem critérios	4999309 (98.17%)	21176 (64,79%)	13264033 (97.34%)
	Média residual (m)	-0.082	-0,009	-0.081
Ordem 1a	N.º de nodos considerados	5092350	54855	13627026
	Nodos que satisfazem critérios	5088667 (99.93%)	54728 (99,77%)	13616748 (99.92%)
	Média residual (m)	-0.343	-0,368	-0.337

Tabela C.7 – Resultados da BASE QCReport sobre a CUBE 2 (MBCC)

		Modelos Batimétricos de Cobertura Completa		
		2-CC-Barra-1m	2-CC-Barra-2m	2-CC-Comercial-1m
Intervalo de profundidade (m)		0 – 20	18 - ...	0 – 20
N.º de nodos existente no MB		1271407	13939	3414539
N.º de nodos povoados		1271399 (100,00%)	13930 (99,94%)	3412148 (99,93%)
N.º de <i>holidays</i> detectados		2	3	20
Ordem especial	N.º de nodos considerados	1271399 (100,00%)	8297 (59,56%)	3412028 (100,00%)
	Nodos que satisfazem critérios	1227766 (96,57%)	5413 (65,24%)	3383727 (99,17%)
	Média residual (m)	-0,079	-0,023	-0,084
Ordem 1a	N.º de nodos considerados	1271399	13930	3412028
	Nodos que satisfazem critérios	1271388 (100,00%)	13915 (99,89%)	3412022 (100,00%)
	Média residual (m)	-0,339	-0,371	-0,341

Tabela C.8 – Requisitos de densidade da NOAA sobre a CUBE 2

Modelos Batimétricos		N.º de nodos estimados no MB	N.º de nodos com menos de 5 sondas	% nodos com pelo menos 5 sondas
Deteção de Objectos	2-DO-Barra-0_5m	5092351	51870	99,0
	2-DO-Barra-1m	54857	1651	97,0
	2-DO-Comercial-0_5m	13627482	28741	99,8
Cobertura Completa	2-CC-Barra-1m	1277260	2068	99,8
	2-CC-Barra-2m	13927	83	99,4
	2-CC-Comercial-1m	3412148	2102	99,9

Referências Bibliográficas

Artalheiro, F. (2003): “Apontamentos de Levantamentos Hidrográficos LH 05 – Sondadores Multifeixe”, Escola de Hidrografia e Oceanografia, Instituto Hidrográfico. (Trabalho não publicado).

CARIS (2011): “HIPS and SIPS 7.1 - User Guide”, CARIS.

Hammerstad, E. (1998): “EM Technical Note - Multibeam Echo Sounder Accuracy”, Kongsberg-Simrad.

Instituto Hidrográfico (2008a): “Especificação Técnica para Planeamento, Execução e Processamento de Levantamentos Hidrográficos”, Instituto Hidrográfico.

Instituto Hidrográfico (2011a): “Tabela de Marés”, Instituto Hidrográfico.

Instituto Hidrográfico (2011b): “Relatório final de trabalho (REL FT HI 07/11) - Levantamento hidrográfico em Setúbal”, Instituto Hidrográfico.

Kongsberg, (2005): “EM 3002 Multibeam Echo Sounder - Operator Manual”, Kongsberg Maritime.

Mayer, L. (2004): “Error Estimation in Swath Sounding”, 36th Multibeam Sonar Training Course (Norway), Ocean Mapping Group, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, Canada.

NOAA (2010a): “Field Procedures Manual”, National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Coast Survey, Abril 2010.

NOAA (2010b): “NOS Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables”, National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Coast Survey, Abril 2010.

OHI (2005): “M-13 IHO Manual on Hydrography”, 1ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

OHI, (2008): “S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys”, 5ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

Rice, G., Calder, B. (2009): “A Quantitative Approach to the Resolution of Bathymetric Representation”, U.S. Hydro Conference, Norfolk, USA.

Apêndice D

Comparação das sondas do PBF tradicional com as profundidades dos modelos batimétricos

O presente Apêndice é o resultado da comparação entre as sondas relevantes discriminadas no Relatório Final de Trabalho do LH realizado em Setúbal e as profundidades estimadas pelos modelos batimétricos (MB) criados.

Legenda:

Na interpretação das figuras do presente apêndice devem-se considerar a seguintes abreviaturas e características:

- MBDO Modelo Batimétrico de Detecção de Objectos
- MBCC Modelo Batimétrico de Cobertura Completa
- C-MBDO Modelo Batimétrico de Detecção de Objectos Conservativo
- C-MBCC Modelo Batimétrico de Cobertura Completa Conservativo
- Profundidades dos modelos batimétricos (MB) desenhadas a preto
- Cores dos MB adaptadas à gama de profundidades de cada modelo
- Exageração vertical dos MB: 1
- Iluminação solar dos MB: 45°
- Sondas e isóbatas das implantações gráficas (IG) desenhadas a branco
- Sonda considerada relevante após concluído o processamento tradicional: cruz vermelha
- Sistema de coordenadas das sondas: GRS 80 – UTM 29, na forma X, Y, Z

Nota:

De acordo com as recomendações da NOAA (secção 2.6.2.5. do corpo da dissertação) as sondas designadas foram incluídas na geração dos MBDO e nos MBCC finais do LH de Setúbal. De modo a permitir uma análise mais abrangente foi opção não incluir as sondas designadas nos MB conservativos (C-MBDO e C-MBCC).

