Utilização de modelos de ondulação do geoide em levantamentos hidrográficos em Cabo Verde

J. Gaspar(1), J. Vicente(2) e M. Arenga(2)
(1) Instituto Hidrográfico, rosado.gaspar@hidrografico.pt; (2) Instituto Hidrográfico

Resumo: Em 2004, no âmbito do acordo de cooperação entre Portugal e Cabo Verde, por solicitação da Agência Marítima e Portuária, o Instituto Hidrográfico retomou a realização de levantamentos portuários naquele arquipélago, com o objetivo de atualizar a cartografia náutica oficial. Nestes levantamentos, a referenciação das profundidades observadas ao Zero Hidrográfico tem sido feita recorrendo a dados de maré obtidos por marégrafos portáteis, instalados aquando da execução dos levantamentos. No entanto, a utilização do sistema de posicionamento *Differential Global Navigation Satellite System* em modo Real *Time Kinematic* apresenta diversas vantagens, entre as quais, minimiza a influência do comportamento dinâmico e da arfagem das embarcações de sondagem, e da variação espacial e temporal da altura de maré. Assim, o objetivo desta comunicação é analisar a adequabilidade de modelos locais e globais da ondulação do geoide, essenciais para a utilização deste sistema de posicionamento, comparando ambas as metodologias para o processamento dos dados de sondagem do levantamento realizado em 2016.

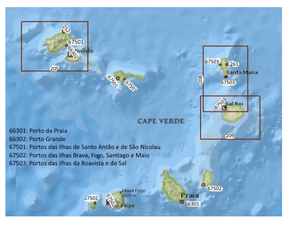
1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projeto de Cooperação no Domínio da Hidrografia entre Portugal e Cabo Verde, o Instituto Hidrográfico (IH) retomou em 2004 os levantamentos hidrográficos (LH) naquele arquipélago, com o objetivo de produção de um novo fólio cartográfico (Lopes e Arenga, 2006).

LH em CABO VERDE

2004	2006	2007	2009	2010	2016
Palmeira - ilha do Sal	Porto Grande - ilha de S. Vicente	Palmeira - ilha do Sal	Porto Inglês - ilha do Maio	Marina do Mindelo - ilha de S. Vicente	Praia - ilha de Santiago
Sal-Rei - ilha da Boavista		Baía de Sta. Maria - ilha do Sal	Vale de Cavaleiros - ilha do Fogo	Porto Novo - ilha de Santo Antão	Vale de Cavaleiros - ilha do Fogo
Praia - ilha de Santiago			Furna - ilha Brava	Preguiça - ilha de S. Nicolau	Furna - ilha da Brava
Tarrafal - ilha de São Nicolau			Tarrafal - ilha de Santiago		Porto Novo - ilha de Santo Antão
					Porto Grande - ilha de S. Vicente

Novo fólio cartográfico de Cabo Verde



No total das campanhas, contabilizam-se 170 dias de trabalho de campo. Como desafios, destacam-se os aspetos logísticos, que se prendem essencialmente com o transporte de equipamentos e a disponibilização de meios, a cargo das entidades locais.

Do ponto de vista técnico, a referenciação das profundidades observadas ao Zero Hidrográfico (ZH), localizado 0.80 m abaixo do Nível Médio Adotado (NMA) (MHACV, 1947), foi feita recorrendo a dados de maré obtidos por marégrafos portáteis:

- Nas áreas de trabalho onde existiam marcas de nivelamento (MN), os marégrafos foram referenciados por nivelamento geométrico (NG);
- Nas outras situações, o nível de referência para os dados de maré foi estimado por correlação com os dados de observações simultâneas de marégrafos instalados noutras ilhas.

No sentido de, em alternativa a este método de redução das profundidades, alcançar as vantagens (Nunes *et al.*, 2013) inerentes ao posicionamento da embarcação no modo *Global Navigation Satellite System Real Time Kinematic* (GNSS-RTK), foi analisada a adequabilidade de um modelo global ajustado à área de um levantamento neste arquipélago e de um modelo de separação criado entre o *datum* vertical e o elipsoide, como soluções onde não exista um modelo local do geoide. Pois, ao contrário de Portugal continental, onde existe o geoide GeodPT08 (Catalão, 2009; DGT, 2016), em Cabo Verde têm de ser encontradas soluções para a utilização do posicionamento no modo GNSS-RTK.

2. METODOLOGIA UTILIZADA

2.1 ÁREA DE ESTUDO : Porto Grande, na ilha de S. Vicente.

2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

- Março de 2016;
- LH de ordem 1b, de acordo com OHI, 2008;
- Sondador de feixe simples (SFS);
- Posicionamento (horizontal e vertical) GNSS RTK da embarcação de sondagem, a partir de uma estação de referência instalada num local portuário apropriado, cuja posição foi obtida com recurso a observações GNSS, com 17 horas de duração, processadas na aplicação CSRS-PPP (NRC, 2016);
- Leituras de maré com marégrafo radar instalado próximo de uma MN.

2.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE

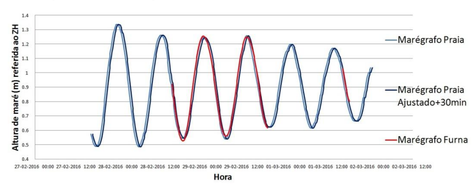
As sondas observadas foram processadas e referenciadas ao ZH de três modos diferentes:

- Utilizando as leituras de maré;
- Utilizando o posicionamento RTK e o *Earth Gravitational Model 2008* (EGM 2008) (NGA, 2016) ajustado;
- Utilizando o posicionamento RTK e um modelo local de separação entre o *datum* vertical e o elipsóide (MLS-DV-E).

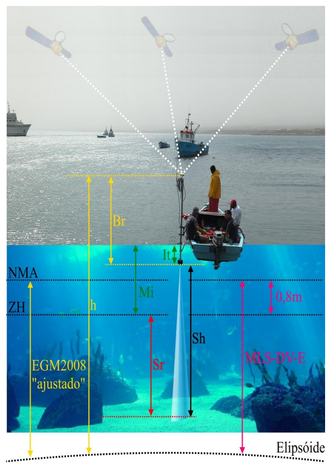
Para comparação, a partir das sondas reduzidas validadas, foram gerados modelos batimétricos (MB) com 2 m de resolução, selecionando para cada nodo a sonda mínima existente no interior de cada nodo.

Observação da maré com fita de marés e marégrafo radar

Exemplo de correlação de dados de maré



Variáveis consideradas nos processos de redução de sondagem



Ar: arfagem da embarcação.

Br: distância vertical entre o centro de fase da antena GNSS e a face do transdutor.

h: altura elipsoidal do centro de fase da antena GNSS .

It: valor médio da imersão do transdutor.

Mi: maré instantânea.

Sh: sonda à hora (profundidade determinada pelo sondador e referida à face do transdutor).

Sr: Sonda reduzida *ao datum* vertical.

LH Porto Grande 2016

Topografia de linha de costa com equipamento GNSS e embarcação de sondagem

Coordenação GNSS do Marco Geodésico da Rochina

Coordenação GNSS da Marca de Nivelamento IH BH 65/2015

3. REDUÇÃO DA SONDAGEM AO DATUM VERTICAL

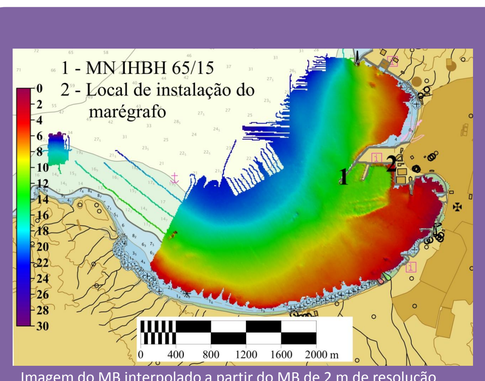
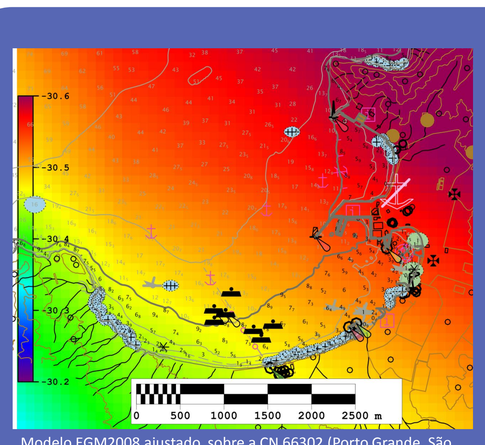


Imagem do MB interpolado a partir do MB de 2 m de resolução processado com observações de maré, sobre a CN 66302 (Porto Grande, São Vicente).

Marés

Na referenciação da sondagem ao *datum* vertical a partir de observações de maré é necessário que o marégrafo esteja referido ao NMA (consequentemente ao ZH). A sonda reduzida (*Sr*) é dada pela seguinte equação:

$$Sr = Sh + It - Mi - Ar$$

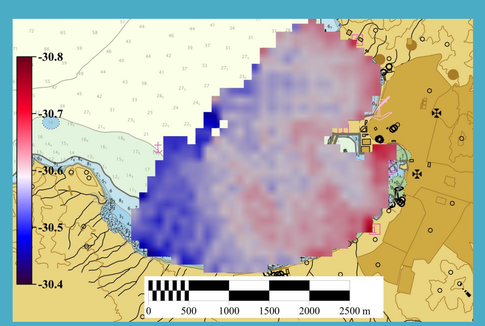


Modelo EGM2008 ajustado, sobre a CN 66302 (Porto Grande, São Vicente).

EGM2008 ajustado (EGM2008Ajust)

1. Determinação da altitude ortométrica de uma MN (IH BH 65/2015), localizada junto ao molhe N.º 2 do Cais Comercial do Porto Grande, de duas formas:
   - NG a partir da MN de referência do marégrafo (MHACV4);
   - Determinação da altitude elipsoidal a partir de 3 horas de observações GNSS, e posterior conversão em altitude ortométrica a partir do valor local do modelo EGM2008.
2. Comparação das altitudes ortométricas obtidas pelos dois métodos: diferença de 0.41 m.
3. Adição da diferença ao modelo para ajuste ao NMA.
4. *Sr* é dada pela seguinte expressão:

$$Sr = Sh + Br - h + EGM2008Ajust - 0{,}8$$



Modelo MLS-DV-E com 100 m de resolução, sobre a CN 66302 (Porto Grande, S. Vicente)

Modelo MLS-DV-E

1. Modelo implementado na aplicação CARIS HIPS *and* SIPS versão 9.1.1 (CARIS, 2016).
2. Utiliza, num cálculo inverso, a informação das sondas reduzidas a partir da maré. Permite todas as vantagens do posicionamento GNSS RTK, considerando, como limitação à sua utilização, que as diferenças espaciais e temporais da maré em quaisquer dois pontos da área sondada são irrelevantes relativamente aos requisitos do LH.
3. Partindo da definição da resolução (neste caso, foi selecionado o valor de 100 m), a aplicação determina para cada nodo do modelo a média de todas as amostras (*Ai*) existentes no interior de cada célula, sendo *Ai* determinada a partir da seguinte equação:

$$Ai = h - Sh - Br - Ar + Sr$$

Determinado o modelo de separação, o cálculo das *Sr* com posicionamento RTK é equivalente ao realizado para o EGM2008 ajustado.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Foram comparados entre si, os MB finais com 2 m de resolução, obtidos em cada um dos processos de redução da sondagem.

Da comparação entre o MB gerado com as sondas referidas verticalmente ao ZH a partir do MLS-DV-E e o MB gerado com as sondas reduzidas de maré, foi gerado um MB que, para efeitos de visualização, deu origem a uma rede triangular irregular (TIN).

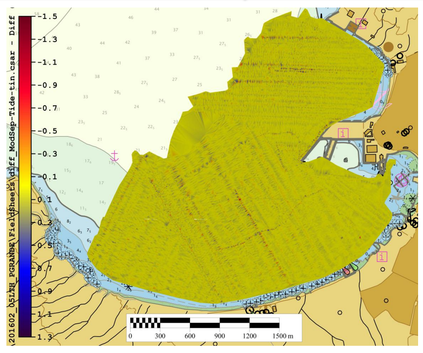
Estatisticamente, foram efetuadas 190 038 comparações, resultando numa média de 0.00 m e um desvio padrão de 0.08 m.

No entanto, cerca de 1.5 % e de 0.2 % das diferenças apresentam, respetivamente, valores superiores a metade e a uma vez a máxima incerteza vertical admissível para levantamentos de ordem 1 (cerca de 0.52 m para uma profundidade de 10 m), situações que correspondem a degradação, perda ou multitrajeto do sinal GNSS RTK, comprovado pela análise dos datagramas da altitude elipsoidal da antena GNSS nestas situações.

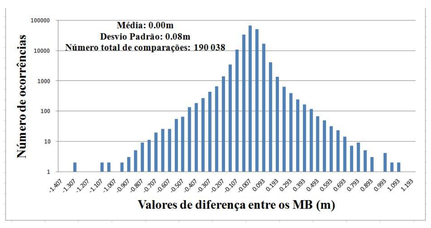
As diferenças de menor valor (em regra, oscilações entre valores negativos e positivos inferiores a metade da máxima incerteza vertical admissível) correspondem aos erros induzidos pela alteração da imersão do transdutor em função do comportamento dinâmico da embarcação e à assunção de um valor constante para *Br* (valor que na realidade depende do balanço e do cabeceio), realçando-se que maioritariamente, as fiadas de sondagem foram realizadas na presença de estado do mar adverso (vaga e/ou ondulação superior a 1 m, por vezes na ordem dos 2 m), razão para o incremento da incerteza de diversas medições, como por exemplo, a arfagem.

Comparando os MB gerados com as sondas referidas verticalmente ao ZH a partir do EGM2008Ajust e a partir do MBMLS-DV-E conclui-se, em geral, a semelhança entre modelos. As diferenças (190 038 comparações, com uma média de -0.06 m e um desvio padrão de 0.03 m) ficam a dever-se ao facto da leitura da maré ter sido feita num único ponto e o ajuste feito ao modelo global EGM2008 ter sido quantificado tendo em consideração a diferença obtida, também num único ponto, entre a altitude elipsoidal e a cota ortométrica.

TIN construído a partir da superfície de diferenças (m) entre o MB das sondas reduzidas com o MLS-DV-E e o MB das sondas reduzidas com maré, sobre a CN 66302 (Porto Grande, São Vicente)



Distribuição estatística das diferenças entre o MB das sondas reduzidas com o MLS-DV-E e o MB com sondas reduzidas com maré



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados alcançados, neste estudo, demonstram que a utilização de um MLS-DV-E ou de um modelo global de ondulação do geoide ajustado são soluções possíveis na referenciação vertical de dados batimétricos, garantindo as especificações dos LH e permitindo a utilização do posicionamento GNSS-RTK.

No entanto, a aplicabilidade das soluções apresentadas a outros locais terá, necessariamente, de ser avaliada primeiro. Em situações futuras, a compensação dos modelos deverá prever uma rede local de observações.

Parte das diferenças encontradas na análise de resultados não são necessariamente resultado dos modelos utilizados, podendo dever-se à incerteza das medições não comuns às três metodologias seguidas.

A comparação entre metodologias de referenciação da informação batimétrica deve ser prática comum para efeitos de controlo de qualidade de um LH, permitindo a identificação de erros nas observações.

REFERÊNCIAS

CARIS (2016). CARIS HIPS and SIPS 9.0.22 (User Guide). CARIS.

Catalão, J., 2009. GeodPt08 - Um modelo de Geóide para Portugal Continental. Cartografia e Geodesia 2009, Colégio Nacional de Engenharia Geográfica da Ordem dos Engenheiros, Actas da VI Conferência Nacional de Geodesia e Cartografia.

DGT (2016): http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/geodesia/transformacao_de_coordenadas/modelo_do_geoide/, Direção Geral do Território, sítio consultado em 7 de maio de 2016.

Lopes, C. e Arenga, M. (2006). Relatório de Missão Representativa (REL MR HI 03/05). Visita técnica a Cabo Verde no âmbito da Hidrografia e Cartografia. Edição fevereiro de 2006, Instituto Hidrográfico.

MHACV (1946). Relatório do Chefe de Missão da Missão Hidrográfica do Arquipélago de Cabo Verde.Edição de abril de 1947.

Nunes, P., Vicente, J., Lobo, A., Miranda, M., Monteiro, C. e Cruz, J. (2013). Levantamentos hidrográficos com incerteza decimétrica? 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. LNEC.

NRC (2016): http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/tools-applications/10925#ppp, Natural Resources Canada, sítio consultado em 7 de maio de 2016.

NGA (2016): http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_gis.html, National Geospatial-Intelligence Agency, sítio consultado em 7 de maio de 2016.

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

Conhecer o mar para que todos o possam usar