



Aplicação de uma Metodologia de Derivação de Batimetria a partir de Imagens de Satélite

Rui GUERREIRO¹ e Ana MOURA¹

¹ Instituto Hidrográfico, Lisboa

(xavier.guerreiro@hidrografico.pt; ana.moura@hidrografico.pt)

Palavras-chave: Imagens de Satélite, Modelos Batimétricos, Sensores Multiespectrais

Resumo: Nas últimas décadas tem-se verificado um aumento de programas de observação da terra decorrentes de iniciativas comerciais e institucionais.

No que respeita a sensores multiespectrais, a cada lançamento de um novo satélite verifica-se o incremento de novas e melhores capacidades: maiores resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais, maior capacidade de armazenamento e transmissão de dados.

Tirando partido dessas capacidades, têm vindo a surgir novas aplicações para os dados desses sensores. Com efeito, satélites de observação da terra recentes como o *Landsat 8* ou o *Sentinel-2A* já incluem bandas espectrais dedicadas à observação da coluna de água em zonas costeiras nos seus sensores.

As metodologias de Derivação de Batimetria a partir de imagens de Satélite estiveram limitadas ao exercício académico até meados de 2010. Desde então, e coincidindo com o período de operacionalização desses satélites, o interesse nessas metodologias tem vindo a crescer, inclusive dentro da própria Organização Hidrográfica Internacional, tendo sido discutida a sua aplicação na 5ª Conferência Extraordinária que ocorreu em outubro de 2014.

Pretende-se com este artigo divulgar metodologias aplicadas à Derivação de Batimetria a partir de imagens de Satélite, casos de estudo, resultados obtidos e orientações futuras para a sua utilização.



1. Introdução

As metodologias de Derivação de Batimetria a partir de imagens de Satélite (SDB) têm vindo, nos últimos anos, a despertar o interesse de organizações nacionais e internacionais e da comunidade técnica ligada à Hidrografia. Com efeito, a Organização Hidrográfica Internacional (IHO) promoveu a discussão do estado da arte destas metodologias na 5ª Conferência Extraordinária, que ocorreu em outubro de 2014. Dessa discussão resultou que estas metodologias ainda não são suficientemente robustas para serem consideradas como uma alternativa aos levantamentos hidrográficos (LH) acústicos e LiDAR, no que concerne à segurança da navegação. Contudo, dessa Conferência resultou também o incentivo aos estados membros para o desenvolvimento e estudo da aplicabilidade de metodologias SDB, como contributo para a cobertura mundial de dados batimétricos.

Em dezembro de 2013, por deliberação do Conselho de Ministros foi criado o Grupo de Trabalho de Observação da Terra (GTOT), órgão coordenado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) que reúne 25 organismos da Administração Pública e no qual o Instituto Hidrográfico (IH) participa. O GTOT tem vindo a promover a utilização de dados de programas de Observação da Terra da União Europeia (EU) e da Agência Espacial Europeia (ESA), em particular do Programa Copernicus, o qual prevê que os estados membros da EU tenham acesso gratuito aos seus serviços, entre os quais os dados das missões Sentinel.

É neste contexto que surge no IH, a vontade de dar início a estudos quanto à aplicabilidade de metodologias SDB a partir de imagens multiespectrais. Em teoria, as metodologias SDB apresentam vantagens em relação aos LH tradicionais no que respeita à área coberta, capacidade de revisita, operação independente de fatores ambientais, menores custos operacionais, entre outras. Dadas as dúvidas atrás referidas acerca da robustez das metodologias SDB, no que respeita à segurança da navegação, foram identificadas outras possibilidades de aplicação: alimentação de modelos de correntes de deriva litoral, acompanhamento de processos de dinâmica do litoral e apoio ao planeamento de LH tradicionais.

Neste artigo é abordada a primeira metodologia SDB testada no IH, bem como alguns casos de estudo da sua aplicação nalguns locais da costa de Portugal Continental: Barra da Armona, Porto de Setúbal e Golada do Bugio.

2. Metodologia

2.1 Introdução

O princípio base das metodologias SDB assenta no pressuposto de que a luz solar é capaz de penetrar na água, percorrer a coluna de água até ao fundo marinho e voltar à superfície por reflexão. É certo que o pressuposto é válido até determinadas profundidades na componente espectral entre os 350 nm (ultra violeta) e os 700 nm (vermelho) em função das características da água. No entanto acima dos 550 nm (verde) é pouca a radiação solar que ultrapassa as dezenas de metros (Mobley, 1994). Assim, foi procurada a solução para o processamento de imagens multiespectrais, aplicando algoritmos e modelos de correção necessários à derivação do modelo SDB. Na Figura 1 é apresentado o fluxo de processamento da metodologia deste trabalho.

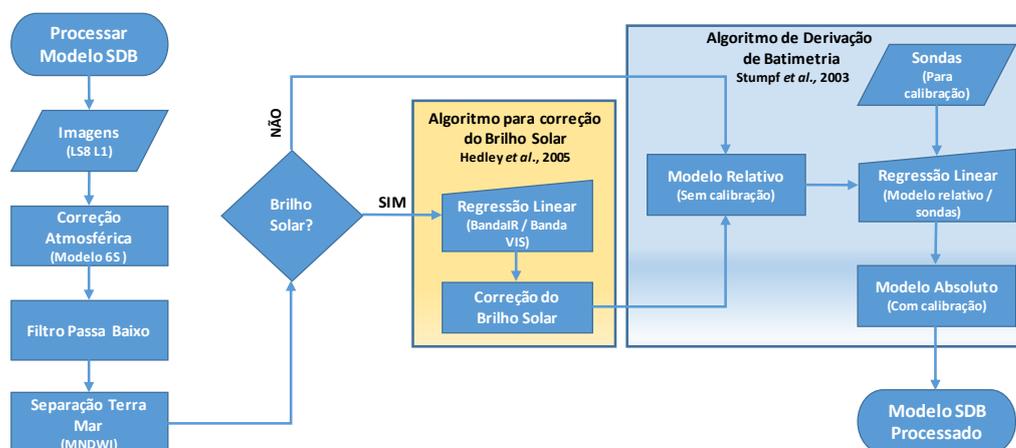


Figura 1 – Fluxograma de processamento

As ferramentas escolhidas para o processamento têm Licença Pública Geral GNU de distribuição livre e código aberto: *Atmospheric and Radiometric Correction of Satellite Imagery* (ARCSI) desenvolvido pela Universidade de Aberystwyth (Reino



Unido), para a correção atmosférica das imagens, e *Sentinel-2 Toolbox* (S2-TBX) para implementação de cálculo dos algoritmos e visualização de dados. Tratando-se de um estudo inicial, esta solução apresentou-se como válida, simples de aplicar e sem custos associados.

Considerando o estímulo à utilização de dados do Programa Copernicus, a missão candidata para alimentar esta metodologia seria a *Sentinel-2* (S-2), a qual é constituída por uma constelação de dois satélites: *Sentinel-2A* e *Sentinel-2B*. No entanto, à data de início deste estudo o primeiro satélite desta missão ainda não tinha sido lançado, o que acabou por ocorrer a 23 de junho do presente ano, enquanto o segundo tem data de lançamento prevista para o segundo semestre de 2016. Por consequência, os dados utilizados neste estudo são da *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM). Lançada a 11 de fevereiro de 2013 e mais conhecida pelo nome do seu satélite, *Landsat 8* (LS8), esta missão resulta de uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o *United States Geological Survey* (USGS). Da LDCM fazem parte os instrumentos *Operational Land Imager* (OLI), e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), sendo as bandas espectrais do primeiro semelhantes às do *Multispectral Instrument* (MSI) da missão S-2, embora a resolução espacial seja menor (excetuando a banda pancromática, inexistente no MSI).

Quadro 1 – Características da missão Landsat 8

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (nm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica
OLI	1 – Coastal aerosol	430 – 450	30	16 dias	16 bits em produtos L1
	2 – Blue	450 – 510			
	3 – Green	530 – 590			
	4 - Red	640 – 670			
	5 – Near Infrared (NIR)	850 - 880			
	6 – Short Wave Infrared 1 (SWIR1)	1570 – 1650			
	7 – Short Wave Infrared 2 (SWIR2)	2110 - 2290			
	8 - Panchromatic	500 – 680	15		
	9 - Cirrus	1360 – 1380	30		
TIRS	10 - Thermal Infrared 1	10 600 – 11 190	100 * (30)		
	11 - Thermal Infrared 2	11 500 – 12 510	100 * (30)		

As imagens LS8 foram obtidas através do serviço EarthExplorer da USGS (www.earthexplorer.usgs.gov) e estão processadas como produtos *Level-1* (L1), isto é, são ortoretificadas e georeferenciadas ao sistema de projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM), *World Geodetic System 1984* (WGS84). Os produtos L1 incluem as bandas dos instrumentos OLI e TIRS em formato *Digital Numbers* (DN) e um ficheiro de metadados (MTL).

2.2 Correção atmosférica das imagens

Para a correção atmosférica das imagens LS8 foi utilizado o *software* ARCSI. Esta ferramenta permite converter os DN das bandas espectrais 1 a 7 para *Radiance* (RAD) e, esta última, para *Top of Atmosphere Reflectance* (TOA), recorrendo à informação do ficheiro MTL. O modelo de transferência radiativa que o ARCSI aplica para a correção atmosférica é o *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum* (6S), permitindo obter as *Surface Reflectance* (SREF) das bandas processadas. Um dos parâmetros necessários para correr o modelo 6S é a *Atmospheric Optical Thickness* (AOT), normalmente obtida por observações de radiómetros *in situ*. No entanto, a disponibilidade deste tipo de observações é limitada na sua distribuição geográfica e nem sempre existem dados disponíveis para a data pretendida. O ARCSI permite derivar a AOT a partir de imagens LS8. Para tal, é aplicado o algoritmo *Dark Object Subtraction* (DOS) que estima a SREF na banda 2 (SREF B2*). Conhecendo esta última, é possível realizar a inversão numérica do modelo 6S, determinando-se a AOT a aplicar às bandas a corrigir dos efeitos atmosféricos. Para o cálculo do modelo 6S são ainda necessários parâmetros globais atmosféricos (ATMOS) e de aerol

(AEROSOL), disponíveis em ficheiros que acompanham o ARCSI. É também necessário um modelo digital de elevação (DEM), tendo-se utilizado o *Digital Elevation Model over Europe* (EU-DEM) que tem resolução espacial de 30 m.

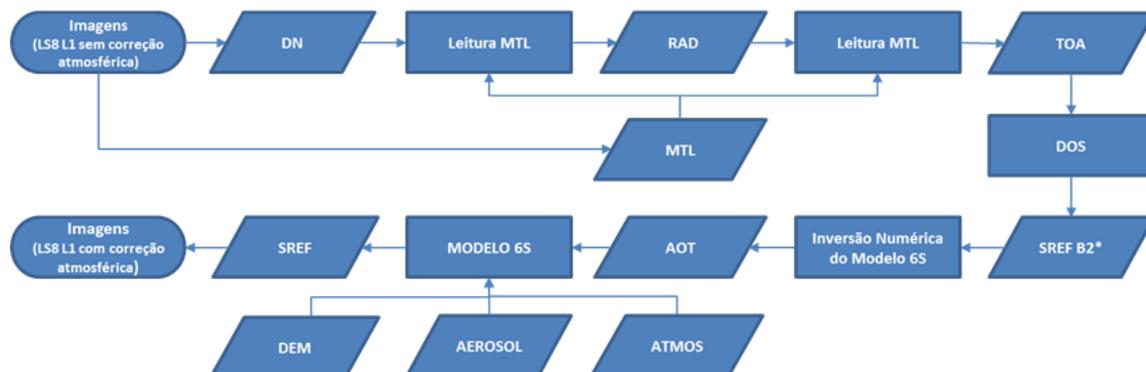


Figura 2 – Fluxograma de processamento da correção atmosférica das imagens com o ARCSI

2.3 Filtro passa-baixo

O processamento das SREF prossegue no S2-TBX, aplicando-se inicialmente um filtro passa-baixo (3 por 3, 1 iteração) para atenuação do ruído. Testes preliminares demonstraram que a aplicação deste filtro melhora o resultado final dos modelos, em particular nas situações em que a imagem foi captada durante condições de agitação marítima consideráveis.

2.4 Separação das componentes marítima e terrestre

A primeira solução testada para a separação das componentes marítima e terrestre das imagens baseou-se na análise do histograma da banda do infravermelho, o que se revelou demorado e pouco automatizável. Procurou-se, então, uma solução automática que não recorresse a informação vetorial da linha de costa. A escolha recaiu na determinação do *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) (Xu, 2006) cuja robustez na aplicação a imagens LS8 foi comprovada por Du *et al.* (2014). O MNDWI é calculado a partir da expressão que se segue:

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (1)$$

onde *Green* é a banda do verde e *MIR* é a banda do infravermelho médio. Neste trabalho considerou-se *MIR* como a banda SWIR1. O MNDWI atribui à componente terrestre valores negativos e à componente marítima valores positivos, sendo a fronteira determinada quando o seu valor é zero. Verificou-se também que da aplicação do MNDWI resulta ainda a eliminação de grande parte das nuvens.

2.5 Correção do brilho solar

O efeito da reflexão do brilho solar na superfície do mar pode impossibilitar ou falsear os resultados das metodologias SDB. O algoritmo que Lyzenga (1985) desenvolveu para corrigir este efeito em imagens multiespectrais é o mais referenciado e é facilmente implementado. No entanto, e conforme demonstrado por Doxani *et al.*, 2012, o algoritmo de Hedley *et al.* (2005) parece obter melhores resultados nas gerações de satélites mais recentes. O algoritmo tem a fórmula que se segue:

$$R'_i = R_i - b_i(R_{NIR} - Min_{NIR}) \quad (2)$$

onde R'_i é o valor do pixel corrigido, R_i é o valor inicial do pixel, b_i é o declive da reta de regressão linear, R_{NIR} é o pixel correspondente na banda do infravermelho próximo e Min_{NIR} é o valor mínimo da amostra nessa banda. As áreas de amostragem definidas para os casos de estudos têm 100 por 100 píxeis (10 000 amostras) e foram selecionadas em zonas de águas profundas, onde facilmente se detetam os efeitos do brilho solar na superfície do mar. Esta escolha pretende incluir na amostra os valores máximos e mínimos do sinal na banda do infravermelho próximo, sendo que a superfície do mar é relativamente opaca nesta componente do espectro eletromagnético (Mobley, 1994). No entanto, no caso de águas túrbidas ou com plumas de sedimentos é expectável que o sinal na banda NIR não seja constante, fazendo com que o algoritmo confunda píxeis com aquelas características

com píxeis afetados pelo brilho solar. Assim, utilizou-se em alternativa a banda SWIR1 de forma a atenuar esse efeito, visto o sinal refletido no comprimento de onda dos 1600 nm sobre águas oceânicas ser negligenciável. Isto é, qualquer radiância que chegue à banda 6 irá compreender apenas os efeitos do brilho solar e da atmosfera (Gerace, 2010). Foram então analisadas as regressões lineares dos pares de bandas 6-1, 6-2, 6-3 e 6-4, de acordo com o exemplo dado na Figura 3:

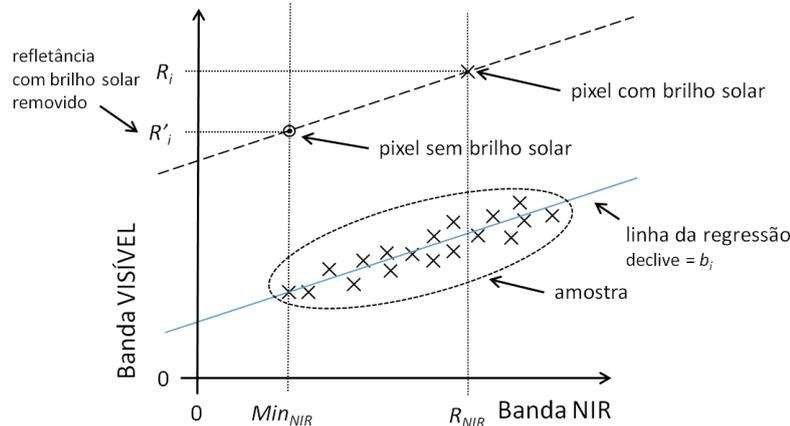


Figura 3 – Interpretação da regressão linear do algoritmo de Hedley *et al.*, (2005)

2.6 Algoritmo de Derivação de Batimetria a partir de imagens de Satélite multiespectrais

O algoritmo SDB utilizado neste trabalho baseia-se na solução apresentada por Stumpf *et al.* (2003), testada com sucesso em zonas de recife de coral. É uma solução empírica que necessita de observações *in situ* para a análise da regressão linear entre profundidade e rácio dos logaritmos naturais das reflectâncias de duas bandas espectrais:

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} - m_0 \quad (3)$$

onde m_1 é uma constante calibrada de forma a criar uma relação entre o rácio das reflectâncias e as profundidades, n é uma constante aplicada de modo a garantir que os logaritmos naturais são sempre positivos e que o rácio produza uma resposta linear com a profundidade, $R_w(\lambda_i)$ é a reflectância no comprimento de onda i , $R_w(\lambda_j)$ é a reflectância no comprimento de onda j e m_0 é o desvio determinado para uma profundidade de 0 m ($Z = 0$).

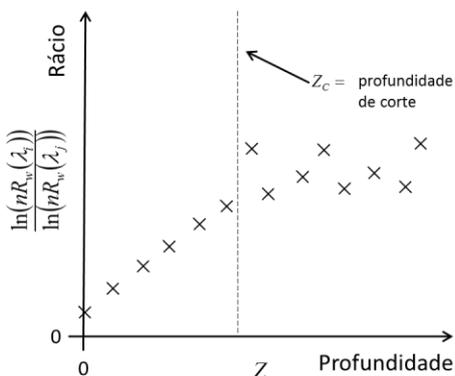


Figura 4 – Determinação da profundidade de corte Z_c

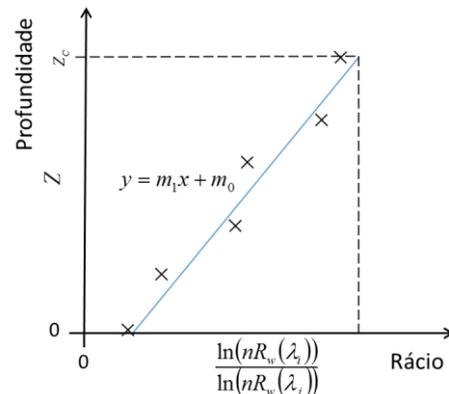


Figura 5 – Regressão linear do rácio com a profundidade

Os valores de m_1 e m_0 são obtidos pela reta da regressão linear já referida e traduzida pela fórmula que se segue:

$$y = m_1x + m_0 \quad (4)$$

No entanto, há primeiro que determinar o valor máximo de profundidade até ao qual é possível estabelecer a regressão linear com o rácio (Figura 4). A este valor chamamos profundidade de corte (Z_c). Para este estudo foram efetuadas as regressões lineares entre as bandas 1-3 e 2-3, conforme Figura 5.

3. Casos de estudo

3.1 Introdução

A escolha das áreas para aplicação da metodologia SDB deste trabalho foi feita ao longo da costa de Portugal Continental, em zonas de pouca profundidade, com diferentes regimes de agitação marítima e onde existissem dados adquiridos com recurso a sondador acústico e reduzidos ao Zero Hidrográfico (ZH), passíveis de serem utilizados na calibração do modelo SDB.

Realça-se que o estudo desta metodologia encontra-se numa fase embrionária. Visto que nesta fase não se prevê a utilização do modelo para obtenção de dados para fins de segurança à navegação, os casos de estudo não se focaram na determinação da profundidade, mas sim na deteção de novas estruturas de fundo e suas alterações. Não obstante, efetuou-se uma comparação dos resultados obtidos pelo modelo SDB com LH.

3.2 Setúbal

O caso de estudo de Setúbal pretende averiguar a mais-valia na utilização da combinação das bandas 1-3 *versus* a combinação 2-3, para a determinação do modelo. Segundo Stumpf *et al.* (2003), com o aumento da profundidade, a refletância das bandas aplicadas no rácio diminui, sendo que o $\ln(R_w(\lambda))$ da banda com maior absorção (banda 3) vai diminuir proporcionalmente mais rápido que o $\ln(R_w(\lambda))$ da banda com menor absorção (banda 1), conforme se observa pela Figura 8. Teoricamente, é no comprimento de onda dos 430 nm que o coeficiente de absorção espectral é menor no caso da água do mar (Mobley, 1994).

Para tal foram construídos dois modelos, usando ambas as combinações, recorrendo às bandas da imagem LS8 de 17 abril de 2013. Para calibração dos modelos foram utilizados dados batimétricos disponíveis em repositório no IH: Sondadores Feixe Simples (SFS) 1992 e 1993 e Sondadores Multifeixe (SMF) 2005 e 2006.

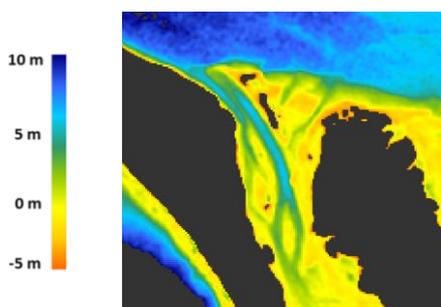


Figura 6 – Modelo com a combinação das Bandas 1-3

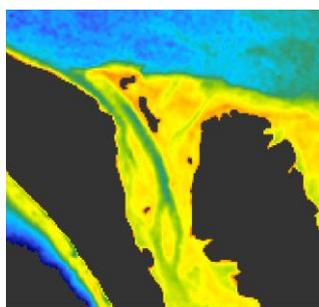


Figura 7 – Modelo com a combinação das Bandas 2-3

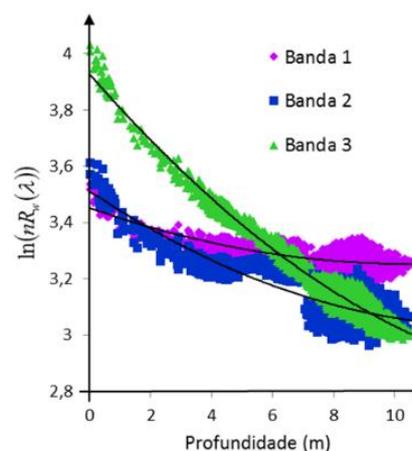


Figura 8 – Gráfico da variação do logaritmo da refletância em função da profundidade

Como é possível observar pelas Figuras 6 e 7, o modelo resultante da combinação das bandas 1-3 define melhor as estruturas do fundo, isto é, obtém-se uma melhor discriminação dos canais, fundões e bancos de areia. Este resultado vai de encontro à teoria, uma vez que a largura da banda 1 situa-se entre os 430 e os 450 nm.

3.3 Barra da Armonia

O caso de estudo da Barra da Armonia pretendeu avaliar a capacidade da metodologia SDB em acompanhar a dinâmica dos fundos em zonas costeiras. Foi elaborada uma série temporal, tendo-se recorrido às melhores imagens disponíveis de 2013 a 2015, em intervalos de aproximadamente 6 meses, coincidindo com as estações de verão e inverno. Nos modelos elaborados foi

apenas utilizada a combinação das bandas 1-3. A calibração dos modelos foi efetuada com dados do LH SFS realizado em novembro de 2010 na Barra de Faro – Olhão.

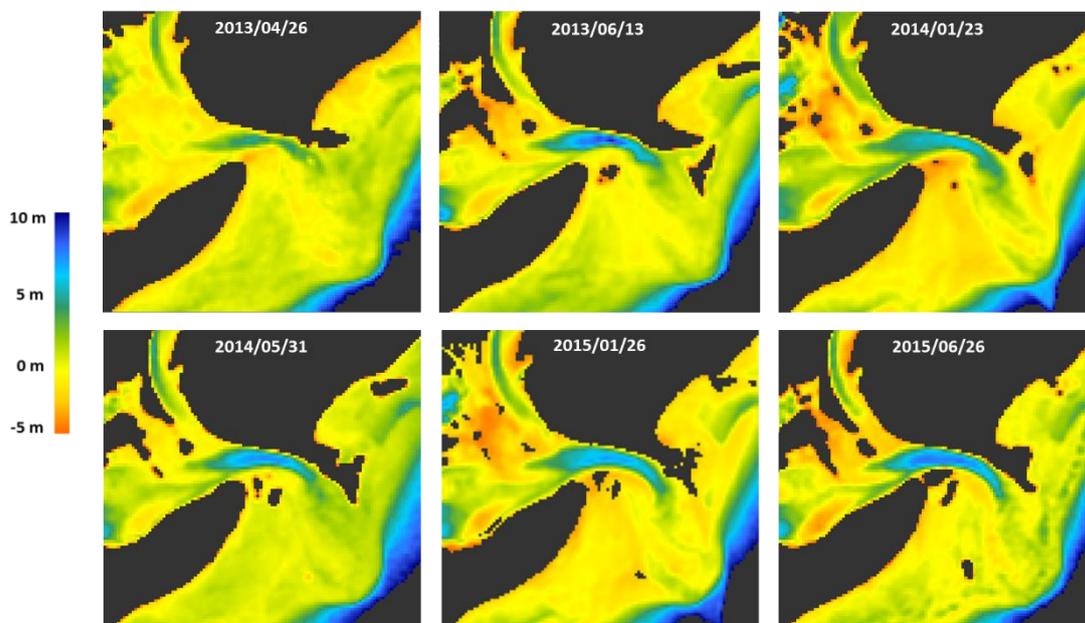


Figura 9 – Série temporal da Barra da Armona elaborada a partir de modelos SDB utilizando a combinação das bandas 1-3

Na Figura 9, é possível identificar as alterações nos fundos e na orientação da Barra da Armona, ao longo da série temporal. Concretizando, o alinhamento da barra vai-se alterando de este-oeste (abril de 2013) para sul-norte (junho de 2015), assim como existe uma tendência para o aumento da profundidade e um estreitar da embocadura do canal. Verifica-se ainda a evolução de um pequeno banco de areia a sul da barra.

Fica assim comprovado que, mesmo com modelos derivados de imagens com 30 m de resolução espacial, é possível acompanhar a dinâmica de fundo ao longo de um período de dois anos, em águas pouco profundas (até aos 10 m).

3.4 Golada do Bugio

No caso de estudo da Golada do Bugio, o modelo resultante da combinação das bandas 1-3 da imagem LS8 de 1 de janeiro de 2015 foi calibrado com dados do LH SFS realizado em 2012. Efetuou-se a comparação deste modelo com dados de um novo LH realizado em setembro de 2014.

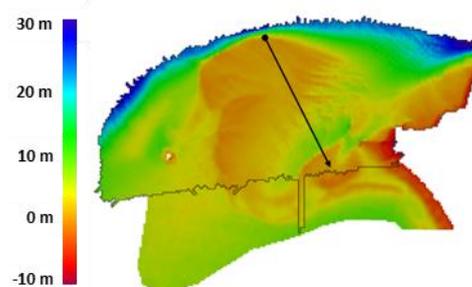


Figura 10 – Modelo LH SFS 2014 sobreposto ao modelo SDB 2015 com traço de perfil

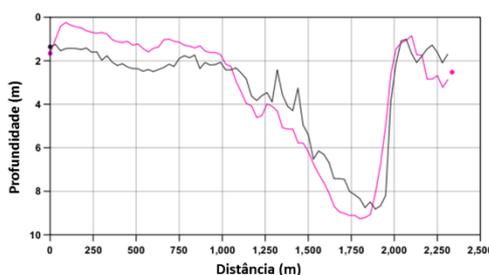
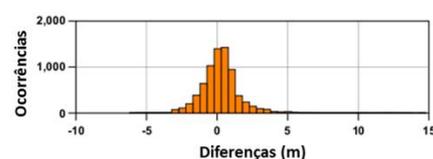


Figura 11 – Perfis dos modelos LH SFS 2014 (preto) e SDB 2015 (rosa)



Estatística

Mínimo: -6,1 m Média: 0,3 m
Máximo: 14,6 m Desvio Padrão: 1,6 m

Figura 12 – Estatística da diferença dos modelos LH SFS 2014 e SDB 2015



Das Figuras 10, 11 e 12 conclui-se que, à semelhança dos casos de estudo anteriores, as principais estruturas do fundo são identificadas até profundidades na ordem dos 10 m. Apesar das diferenças máxima e mínima serem consideráveis, observa-se que as diferenças dos modelos assumem uma distribuição normal com média de 0,3 m e desvio padrão 1,6 m. Eventuais causas para os valores das diferenças encontradas poderão dever-se ao efeito de plumas de sedimentos e de confluência de massas de água com diferentes características, situações que ocorrem em zonas de estuário e foz de rios. No entanto, a ocorrência deste tipo de situações e a sua eventual correção deverão ser objeto de estudo no futuro.

4. Conclusões e Orientações Futuras

Deste trabalho pode-se concluir que a metodologia SDB proposta permite a identificação das principais estruturas do fundo e suas alterações, sendo por isso uma ferramenta válida para o planeamento de LH a realizar, bem como para o acompanhamento da evolução de fundos em águas pouco profundas.

Nos casos apresentados, o modelo apenas se revelou eficaz até aos 10 m de profundidades partindo de imagens obtidas em condições ideais. Foram elaborados casos de estudo para Aveiro e Figueira da Foz, nos quais não foram obtidos resultados satisfatórios. Será necessário aprofundar o estudo estatístico dos modelos, bem como cruzar os resultados com observações de parâmetros oceanográficos (agitação marítima, marés, correntes de maré, material em suspensão na coluna de água e salinidade), para melhor compreender todas as variáveis que contribuem para a solução do modelo SDB.

Como orientações futuras sugere-se a continuação do trabalho desenvolvido, testando algoritmos mais robustos, nomeadamente, para a correção atmosférica em ambientes marítimos e na redução dos efeitos radiométricos do material em suspensão.

É esperado que num futuro próximo sejam disponibilizadas as imagens da missão S-2. Dada a semelhança das características dos sensores multiespectrais das missões S-2 e LS8, e que na primeira as imagens obtidas terão melhor resolução espacial, aguarda-se com entusiasmo a disponibilização desses dados para derivação de batimetria aplicando a metodologia apresentada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e à *United States Geological Survey (USGS)* pelo desenvolvimento, operação da missão e disponibilização dos dados *Level-1* da *Landsat Data Continuity Mission*. Os autores expressam também o seu reconhecimento à Universidade de Aberystwyth e à *European Spacial Agency* pela disponibilização de *software* com Licença Pública Geral GNU de distribuição livre e código aberto, respetivamente ARCSI e S2-TBX. Os autores agradecem ainda à *European Environment Agency* e ao Programa Copernicus a disponibilização do EU-DEM, financiado pela ação preparatória 2009 do GMES em acesso de dados de referência pela *European Comission, DG Enterprise and Industry*.

Referências Bibliográficas

- Lyzenga, D. (1985). Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 6, No. 1, Págs. 115 – 125.
- Mobley, C.D. (1994). *Light and Water – Radiative transfer in Natural Waters*. Academic Press.
- Hedley, J.D.; Harborne, A.R.; Mumby, P.J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 10, Págs. 2107 – 2112.
- Xu, H.K. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 14, Págs. 3025 – 3033.
- Gerace, A. (2010). *Demonstrating Landsat's New Potential to Monitor Coastal and Inland Water*. Thesis, Rochester Institute of Technology.
- Du, Z.; Li, W.; Zhou, D.; Tian, L.; Ling, F.; Wang, H.; Gui, Y.; Sun, B. (2014). Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. *Remote Sensing Letters*, Vol. 5, No. 7, Págs. 672 – 681.
- Doxani, G.; Papadopoulou, M.; Lafazani, P.; Tsakiri-Strati, M.; Mavridou, E. (2013). Sun glint correction of very high spatial resolution images. Consultado em <http://www.researchgate.net/> a 16 de julho de 2015.
- Stumpf, R.P.; Holdereid, M.; Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, Vol. 48, No. 1, Parte 2, Págs. 547-55