

## Análise da variabilidade relativa do Nível do Mar para a região do Algarve

F. Madeira (1) e C. Antunes (1,2)

(1) FCUL – Universidade de Lisboa, fabio.rsmadeira@gmail.com.

(2) IDL – Instituto Dom Luiz, FCUL – Universidade de Lisboa, cmantunes@fc.ul.pt.

**Resumo:** O recurso a registos históricos dos dados maregráficos provenientes do Marégrafo de Lagos, acoplados aos registos mais atuais, permite a determinação da variação relativa atual do Nível Médio do Mar para a região algarvia. A atualização e monitorização da subida do NMM é de extrema importância devido ao seu impacto sobre a ocorrência de eventos extremos de galgamento, erosão e inundação costeira. As observações efetuadas a partir de marégrafos adjacentes e dados de altimetria de satélite servem como indicadores de validação permitindo comparar a taxa de subida do NMM com a taxa global e regional. Nesta comunicação serão apresentadas as séries temporais atualizadas de dados diários e mensais para o intervalo [1908, 2017], com especial atenção ao período mais recente [2004, 2017], relativamente ao qual serão apresentados valores atualizados resultantes de um conjunto de metodologias que permitem estimar a taxa de subida do NMM e correlacioná-la com a taxa global.

**Palavras-chave:** Marégrafo de Lagos, Nível Médio do Mar, Subida do Nível Médio do Mar, Variação relativa do Nível Médio do Mar.

### 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se assistido a um aumento de ocorrências de fenómenos climáticos extremos, associado à subida contínua da temperatura média do sistema climático da Terra. Deste processo é registado um aumento constante na dinâmica dos oceanos, a partir do qual é possível identificar variações eustáticas com comportamentos significativos, tais como expansão térmica (aumento do volume de massa oceânica) e aumento da massa de água por degelo das massas geladas (calotes polares, permafrost e glaciares continentais), resultando no principal impacto para as regiões costeiras, a subida do nível médio do mar (NMM).

Diversos estudos efetuados recentemente demonstram que a taxa de subida do NMM (sNMM) tem tendência crescente (Jevrejeva et al., 2014). Dada a iminência de galgamentos, erosão e inundação costeira, torna-se necessária a implementação de um conjunto de medidas que visa a monitorização do NMM.

O acesso aos dados, via FTP, dos marégrafos nacionais do Instituto Geográfico Português (IGP), atual Direção Geral do Território (DGT), tem possibilitado a análise sobre a variação do NMM na costa portuguesa. Dado o potencial impacto que a sNMM tem na costa algarvia, torna-se de extrema importância o recurso a registos históricos provenientes do antigo marégrafo analógico [1908, 2000] e, mais recentemente, do marégrafo digital de Lagos [2004, 2017]. Para tal, foi necessário recorrer a várias fontes tais como *Permanent Service Mean Sea Level* (PSMSL) e DGT, com vista à obtenção de um maior conjunto de dados de registos maregráficos.

A existência de lacunas na informação e a inexistência de dados em certos períodos, bem como, registos errados em alguns períodos longos, dificultam o processo de análise e tratamento dos dados. Contudo, a partir de um processo rigoroso de correção e validação dos dados numéricos, desde a georreferenciação de maregramas até à validação numérica, é possível recuperar as séries temporais de forma credível.

A metodologia utilizada para esta análise foca a influência de um conjunto de fatores, como o forçamento meteorológico de curto período sobre os dados recentes. O efeito atmosférico tem grande representação nos dados maregráficos, tendo em conta as constantes ações dos centros de altas e baixas pressões, pelo que a sua remoção leva a uma aproximação mais acertada da taxa de sNMM. O apoio a dados de altimetria por satélite permite a análise da taxa de sNMM no âmbito global e regional, embora possa servir como forma de interpretação e análise numa abordagem local, depois de acauteladas as devidas diferenças.

Neste estudo são apresentados os resultados relativamente à análise maregráfica da série secular de médias mensais para o período [1908, 2000], assim como a série de médias diárias referentes ao período mais recente [2004, 2017]. Será também efetuada, para os anos em comum no último período, uma análise comparativa entre a taxa de sNMM e os dados de altimetria de satélite, provenientes de diferentes instituições, referentes à anomalia do nível do mar.

## 2. SÉRIE MENSAL DO NMM

A análise à série mensal é composta por duas etapas: o tratamento aos dados referentes ao período [1908, 1987] retirados da base de dados do PSMSL e referentes ao período [1986, 2000] fornecido pela DGT.

### 2.1. Origem dos dados e identificação de problemas

Através da base de dados do PSMSL foi possível obter a série temporal de médias mensais no período [1908, 1987]. Os valores de NMM obtidos originalmente possuíam uma referência *Revised Local Reference* (RLR), ao qual era definida como sendo aproximadamente 7000 mm abaixo do NMM, a fim de evitar números negativos nos valores RLR mensais. Uma das limitações associadas a esta série é o facto de apenas conter registo mensais, pelo que a única forma de ter acesso a registo diários é a partir da georreferenciação de maregramas digitalizados. Relativamente aos dados referentes ao período [1986, 2000] disponibilizados pela DGT, foi possível efetuar um tratamento diário e mensal, no qual foram detetadas algumas anomalias para os anos de 1988 e 1989. Os anos em questão apresentavam sobre-elevações na ordem dos decímetros.

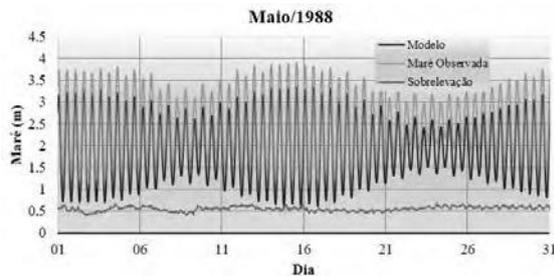


Fig. 1. Gráfico mensal do Marégrafo de Lagos, do mês de Maio de 1988, com maré observada, maré modelada e sobre-elevação (em metros).

A Fig. 1 representa um exemplo do erro detetado. Contudo, por comparação com o modelo de maré astronómica (Antunes, 2007) tal sobre-elevação não é explicável a não ser com erros de referência vertical. Foi efetuado um tratamento numérico restrito, acompanhado por um processo de validação com o apoio de cartas de reanálise de pressão atmosférica, com vista à sua correção de forma a que a série voltasse a ter um comportamento coerente e compatível com os dados dos períodos contíguos.

### 2.2. Série secular

Através da comparação dos anos comuns (1987-88) entre as duas séries (PSMSL e DGT) e de ajustamentos a nível de referencial global da série (NMM de 1908-1917), foi possível completar a série e chegar ao resultado do gráfico da Fig. 2.

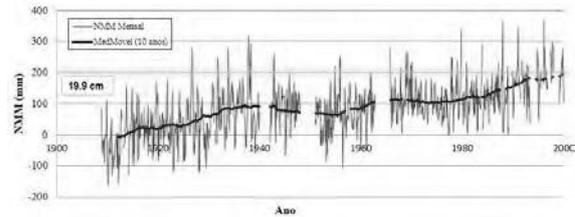


Fig. 2. Série temporal de médias mensais do Marégrafo de Lagos, sobreposta com uma média móvel de 10 anos e respetiva indicação do NMM no período 1908-2000 (em centímetros a amarelo).

## 3. SÉRIE DIÁRIA DO NMM

A análise à série diária do NMM, para o período [2000, 2017] é efetuada a partir dos dados públicos disponibilizados livremente via FTP pela DGT, acrescentada dos anos de [2000, 2003] resultantes de um processo de digitalização realizado a partir de imagens (*raster*) de maregramas disponibilizadas pela Divisão de Geodesia da DGT. Contudo, ao efetuar-se a georreferenciação dos maregramas para este intervalo, observou-se que os anos em questão estavam demasiados incompletos e os dados existentes apresentavam vários problemas a nível técnico do marégrafo.

De forma a obter-se uma maior precisão dos dados diários referentes aos anos mais recentes, foram aplicadas 2 correções, do Efeito Barométrico Inverso (EBI) e da variação sazonal.

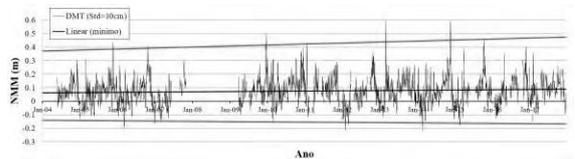


Fig. 3. Série diária do NMM de Lagos (em metros e com desvio padrão, DP, de 10 cm), entre 2004 e 2017.

Os limites máximos e mínimos identificados na Fig. 3, servem para averiguar a tendência de extremos na variação do NMM, nomeadamente a tendência dos máximos correspondentes à ocorrência de temporais. A taxa de sNMM observada é de 1.25 mm/ano, que comparada a outras estações adjacentes para períodos semelhantes, bem como aos dados de altimetria de satélite da zona, demonstra uma clara subestimação.

### 3.1 Correção do forçamento meteorológico

A série de dados da Figura 3 não apresenta qualquer correção meteorológica, pelo que o próximo passo foi reduzir a série do EBI e, os efeitos residuais do forçamento do vento, através da aplicação de uma média móvel.

Inicialmente foi detetada uma deriva instrumental no barómetro digital do marégrafo, facto que causou uma sobrestimação de 2.11 mm/ano. Este problema já tinha sido detetado por Antunes (2016) para o marégrafo de Cascais que, face a este sucedido e antes de ser possível qualquer retificação ou substituição dos valores de pressão atmosférica (PA)

da série, assumiu para o valor de referência da PA a média móvel dos últimos 2 anos em vez do valor médio global dos dados do barómetro do marégrafo. A Fig. 4 mostra a série de médias diárias do NMM corrigida da PA.

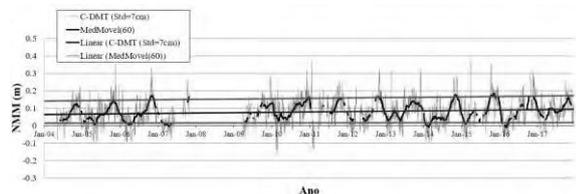


Fig. 4. Série diária do NMM de Lagos (em metros e com desvio padrão de 7 cm) corrigida do EBI e respetiva média móvel de 60 dias.

A média móvel de 60 dias sobreposta à série dá-nos a variação anual do NMM isenta das variações de curto período de forçamento de vento.

### 3.2 Remoção da variação sazonal

A variação intra-anual do NMM (Fig. 5) apresenta um padrão de variabilidade sazonal, na qual se podem observar os valores máximos no último trimestre de cada ano e valores mínimos de março a julho. A variação sazonal da maré de origem astronómica, nomeadamente, a constituinte harmónica anual da maré de influência solar (SA), bem como, a influência de fatores externos (vento, correntes e temperatura da água) é uma componente a ter em conta, que pode e deve ser removida.

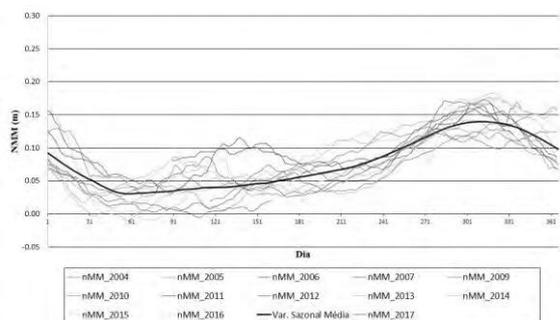


Fig. 5. Variação sazonal (em metros) de 2003 a 2017 e variação média.

A Fig. 5 mostra a variabilidade da variação sazonal dos últimos 13 anos que permite determinar a variação sazonal média do NMM. Ao remover esta variação sazonal média da média diária do NMM corrigida da PA, obtém-se uma série reduzida (Fig. 6) próxima daquilo a que se pode chamar de variação eustática relativa.

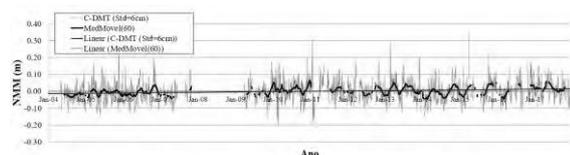


Fig. 6. Série de dados reduzida da variação sazonal (em metros e com 6 cm de DP) e respetiva média móvel de 60 dias com a reta de regressão linear.

Esta série reduzida de variação do NMM apresenta uma variabilidade intra-anual significativamente mais reduzida do que era esperado, da qual se conseguiu extrair uma taxa de sNMM de 2 mm/ano.

## 4. ANÁLISE COMPARATIVA COM ALTIMETRIA DE SATÉLITE E CONCLUSÕES

Dada a correção da variação sazonal da série diária do NMM é possível, através da Tabela I, observar as taxas de sNMM e desvios padrão (DP) para todas as séries atrás referidas. O DP 2.3 cm da série reduzida indica maior estabilidade da estimativa da taxa de sNMM.

Tabela I. Variabilidade (DP em cm) das séries de dados e Taxa de subida do NMM (mm/ano).

Séries	DP Série	Taxa sNMM (mm/ano)	Taxa DP (mm/ano)
Original	9.5	1.3	0.26
Corrigida	7.1	1.6	0.19
MM60_cor	4.6	1.6	0.13
Reduzida	5.7	2.2	0.16
MM60_red	2.3	2	0.06

Comparando o valor referente à série corrigida da variação sazonal, de 2 mm/ano, quer com marégrafos adjacentes (Cascais e Cádiz), quer com altimetria de satélite verifica-se que está subestimado. Este valor baixo poderia estar associado a um processo de maior *uplift* tectónico na zona de Lagos, contrariamente ao que a estação permanente de GPS de Lagos indica, uma subsidência com uma velocidade vertical de -0.5 mm/ano. Contudo, dos dados de neotectónica segundo alguns autores (Figueiredo *et al.*, 2018) para aquela região, encontra-se em processo de *uplifting* com valores de 0.1 a 0.2 mm/ano, por um lado insuficientes para explicar a subestimação face a outras fontes do NMM, por outro contrário ao sentido da taxa de movimento vertical absoluto de GPS.

De forma a tentar perceber esta subestimação, procedeu-se à comparação com dados de altimetria de satélite, a partir do acesso à base de dados da NOAA e CNES (a partir do site AVISO) para obter dados relativos à variação do nível do mar. Em relação aos dados obtidos do site da NOAA, foram escolhidas várias localizações para estimar a variação do NMM ao longo da costa portuguesa com altimetria de satélite, de modo a obter-se uma ideia mais clara do comportamento da superfície do oceano ao longo da costa Portuguesa e sudoeste de Espanha. O período utilizado foi, de acordo com os dados disponíveis, o mais próximo da série em estudo, de 2004 a 2017.

Os locais que serviram como base de validação para observação da variação no nível do mar foram Cascais, Sines, Lagos (Fig. 7), Faro e Cádiz.

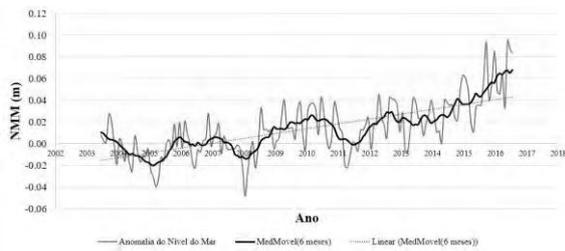


Fig. 7. Série temporal de anomalia do nível do mar, ao largo, para Lagos (em metros) e respetiva média móvel de 6 meses com a reta de regressão linear, no período de 2004 a 2017 (fonte: NOAA).

A partir da Fig. 7 é possível observar-se, ao largo de Lagos, uma taxa de elevação da anomalia do nível do mar de 4.78 mm/ano, que vai ao encontro da tendência global. De modo a provar-se que existe um comportamento similar de variação do nível do mar ao largo dos restantes locais de análise, a Tabela II mostra as respetivas taxas de elevação.

Tabela II. Taxas de elevação da anomalia do nível do mar, ao largo, para Cascais, Sines, Lagos, Faro e Cádiz, em mm/ano.

	Near Cascais	Near Sines	Near Lagos	Near Faro	Near Cádiz
NOAA	3.97	4.61	4.78	3.04	4.23

Os valores observados na Tabela II demonstram uma concordância, não só entre os pontos de estudo, mas também com a taxa estimada para o Atlântico Norte a partir da base de dados do CNES (Fig. 8).

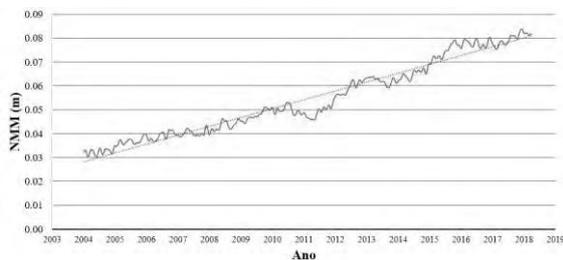


Fig. 8. Série temporal da variação do nível do mar para o Atlântico Norte (em metros) com a reta de regressão linear, no período de 2004 a 2017 (fonte: CNES).

A taxa estimada para o período [2004, 2017] do Atlântico Norte é de 3.73 mm/ano, pelo que é concordante com as várias taxas determinadas anteriormente. Com base na comparação dos valores estimados, entre as entidades NOAA e CNES, com a sNMM para Lagos, pode-se afirmar que não existe uma correlação entre as estimativas regionais e de Lagos. Os valores de altimetria de satélite aqui apresentados permitiram detetar uma subestimação do valor de sNMM para Lagos, de 2.78 mm/ano em relação aos dados da NOAA e de 1.73 mm/ano referente ao CNES. Embora se estejam a comparar estimativas regionais absolutas e relativas, seria, ainda assim, expectável obter uma diferença menor entre as mesmas dado o conhecimento da magnitude de *uplifting* tectónico para a região.

## Agradecimentos

À Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo financiamento através do projeto FCT: “EVREST – PTDC/MAR-EST/1031/2014”.

À Direção Geral do Território, pela cedência e facilitação do acesso aos dados do Marégrafo de Lagos.

## REFERÊNCIAS

- Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa atual. *4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa 21-23 de Junho.
- Antunes, C. (2007). Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal. FCUL Webpage, [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro\\_mares.html](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html).
- Figueiredo, P. M., Rockwell, T. K., Cabral, J., e Ponte Lira, C. (2018). Morphotectonics in a low tectonic rate area: Analysis of the southern Portuguese Atlantic coastal region. *Geomorphology*, DOI:10.1016/j.geomorph.2018.02.019.
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A., Matthews, A. P., e Spada, G. (2014). Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807. *Global and Planetary Change*, vol. 113, p. 11-22.