



Faculdade  
Ciências  
Universidade  
Lisboa



INSTITUTO  
DOM LUIZ

**EVREST – Evolução e  
resiliência de sistemas  
de ilhas barreiras**

# ANÁLISE DA VARIABILIDADE RELATIVA DO NÍVEL DO MAR PARA A REGIÃO DO ALGARVE

**Relatório de Atividades da Bolsa de Investigação**

**Projeto EVEREST - PTDC/MAR-EST/1031/2014**

Fábio Ricardo da Silva Madeira

2017

## Resumo

O presente estudo tem como objetivo estudar a variabilidade relativa do nível do mar para a região do Algarve.

Nesse sentido, foi necessário recorrer ao marégrafo de Lagos tendo em conta que a atual infraestrutura de marégrafos nacionais do IGP (Instituto Geográfico Português, atual Direção Geral do Território - DGT) e respetiva acessibilidade aos dados, via FTP, tem possibilitado um conjunto de análises sobre a variação do NMM (Nível do Médio Mar) na costa portuguesa. Para tal, recorreu-se a várias fontes tais como: PSMSL (Permanent Service Mean Sea Level) e DGT (Direção Geral e Território), entre outras.

A análise a estes dados dividiu-se inicialmente em duas tarefas: tratamento à série de dados mensais (1908-1987 e 1988-2000) e à série de dados diários (1988-2000 e 2000-2016), aliado à necessidade de analisar a série secular (1908-2000) e a série diária mais recente (2000-2016). Pelo meio foram efetuadas tarefas tais como: a correção da velocidade vertical local, a obtenção da série reduzida de dados corrigida do efeito barométrico inverso e reduzida da variação sazonal e, mais tarde, a análise harmónica que permitiu determinar as constituintes harmónicas. Também ficou designado que, caso houvesse tempo, dar-se-ia início à criação de uma base de dados que permitisse a análise e tratamento dos dados de maré de uma forma sistemática.

As conclusões que se podem retirar destes resultados apontam para uma subida de 19.8 cm no último século. No que diz respeito aos últimos 12 anos (tendo em conta que o Marégrafo Acústico iniciou funções em 2004), é detetada uma subestimação cerca de 1.5 mm/ano em relação a estações adjacentes tais como Cascais, Huelva ou Cádiz, onde a taxa de subida do NMM ronda em média os 3 mm/ano. Estes valores contrastam com a informação de GPS (velocidade vertical) e de satélite através de uma análise comparativa da elevação da superfície do mar entre vários pontos ao longo da costa Portuguesa e sul de Espanha, o que leva a crer a existência um problema técnico no aparelho do marégrafo.

# Índice

<b>Resumo .....</b>	<b><i>i</i></b>
<b>1 Tarefas.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Resultados.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Séries Mensais.....</b>	<b>2</b>
2.1.1 Série 1908-1987.....	2
2.1.2 Série 1988-2000.....	3
<b>2.2 Séries Diárias .....</b>	<b>5</b>
2.2.1 Série 1988-2000.....	5
2.2.2 Série 1908-2000.....	6
2.2.3 Série 2004-2016.....	7
<b>2.3 Análise Harmónica .....</b>	<b>12</b>
<b>2.4 Campanha para colocação de sensores.....</b>	<b>13</b>
<b>3 Conclusões.....</b>	<b>14</b>
<b>4 Referências.....</b>	<b>16</b>

# 1 Tarefas

- ✓ Análise e tratamento às séries de dados mensais: 1908-1987, 1988-2000 e 2000-2016;
- ✓ Análise e tratamento às séries de dados diárias: 1988-2000 e 2000-2016;
- ✓ Consulta de documentos históricos do marégrafo de Lagos do arquivo da Geodesia da DGT;
- ✓ Uniformizar as séries mensais 1908-1987 e 1988-2000 para determinar a taxa de subida do NMM no último século para Lagos;
- ✓ Georreferenciação dos maregramas digitalizados para os anos em falta: 2001, 2002 e 2003;
- ✓ Efetuar a análise harmónica para o intervalo [1986-2016];
- ✓ Campanha para colocação de sensores para medição do nível do mar (Lagos, Albufeira e Faro) com o objetivo de aferir e calibrar as medições e registos obtidos pelo marégrafo de Lagos;
- ✓ Criação de uma base de dados, com vista o tratamento de dados maregráficos

## 2 Resultados

### 2.1 Séries Mensais

#### 2.1.1 Série 1908-1987

Através da base de dados do PSMSL (<http://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/162.php>), foi possível obter a série temporal de médias mensais entre 1908-1987.

Os valores de NMM obtidos vinham com referência RLR (*Revised Local Reference*). Esta referência é definida como sendo aproximadamente 7000 mm abaixo do NMM, a fim de evitar números negativos nos valores RLR mensais e anuais.

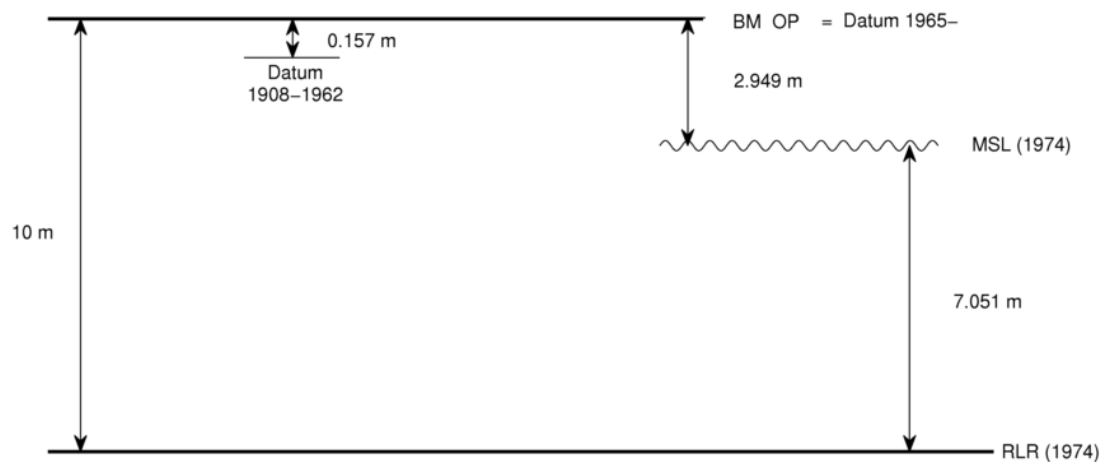


Fig 1. Diagrama RLR para Lagos.

Portanto, a partir da informação da Fig 1, foi possível obter os valores de elevação e respetiva média móvel (24 meses) (Fig 2).

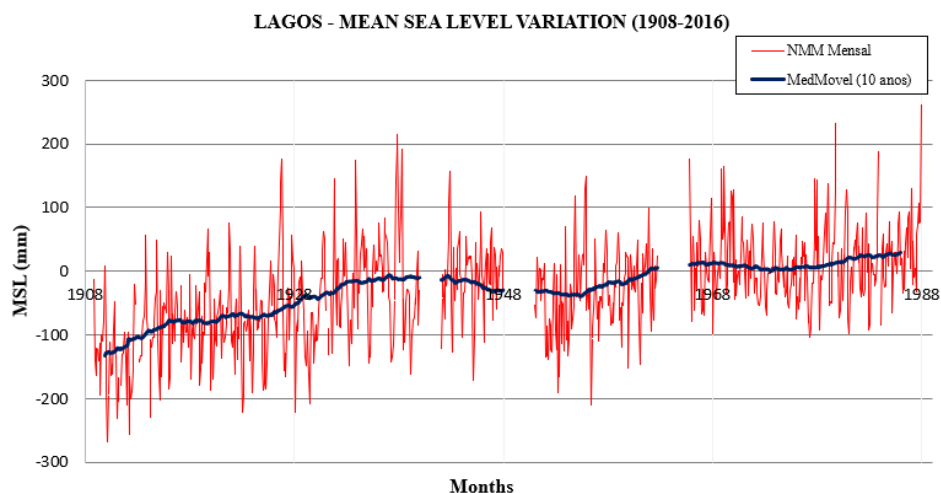


Fig 2. Série temporal do Marégrafo de Lagos de médias mensais, sobreposta com uma média móvel de 10 anos e respetiva regressão linear (em milímetros).

### 2.1.2 Série 1988-2000

Através de um ficheiro fornecido pelo IGP, foi possível obter os valores horários de maré e, conseqüentemente, os valores médios diários e mensais.

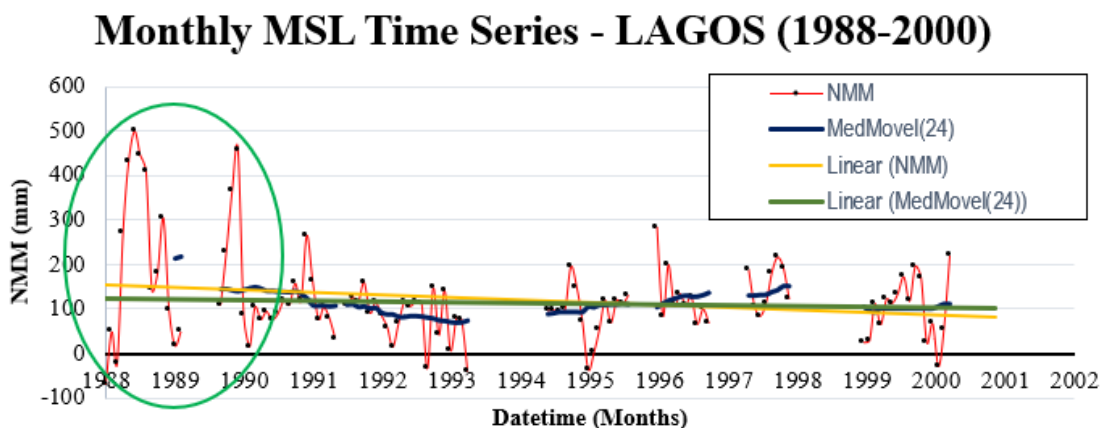
No que diz respeito à série de dados 1988-2000, disponível livremente na base de dados da University of Hawaii Sea Level Center, é possível observar na Fig 3 as principais referências que vinham acompanhadas do ficheiro indicado anteriormente.

Reference Lev: IGP data received relative to cartographic zero (CZ). The datum was changed to hydrographic zero (HZ),  $HZ = 2.000m + (3.089m - IGP \text{ hourly})$

Benchmark NP 1 = 3.835m  
Benchmark bp = 3.089m  
Tide Gauge Benchmark NP M = 3.213m  
Ordnance Datum = 0.000m  
Chart Datum (HZ) = 2.080m

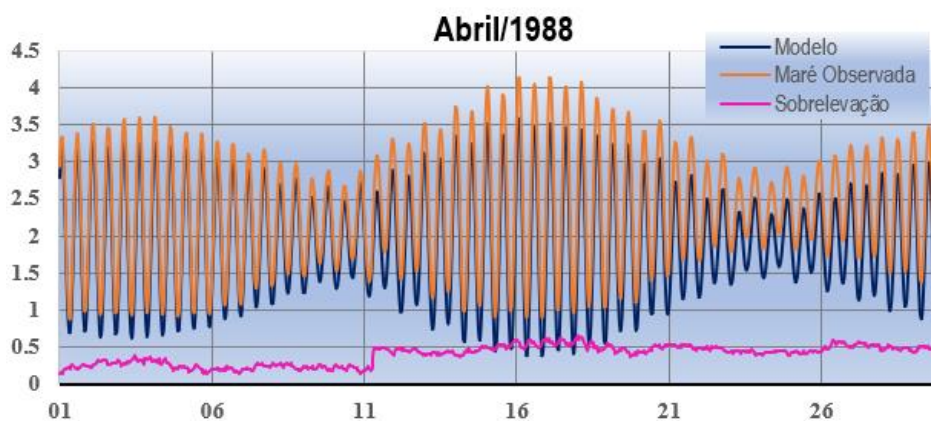
**Fig 3.** Informação relativa às várias marcas de referência do Marégrafo de Lagos para o período de 1988-2000.

A partir dos valores horários de maré encontrados neste ficheiro, foram divididos, organizados e tratados de forma a ser efetuada a média diária e, conseqüentemente, a média mensal, sendo assim possível obter a sua elevação e respetiva média móvel (24 meses). No entanto, foram detetadas algumas anomalias no período 1988-1989 (Fig 4).

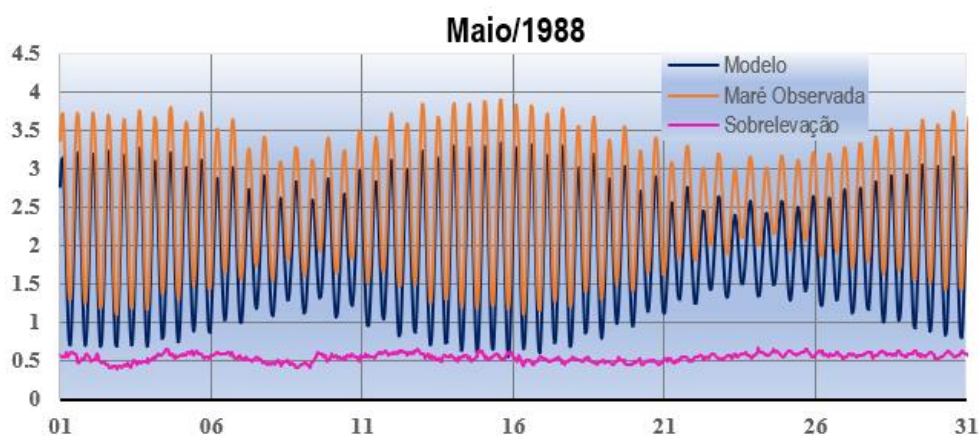


**Fig 4.** Série temporal do Marégrafo de Lagos de médias mensais, sobreposta com uma média móvel de 24 meses e respetiva regressão linear (em milímetros).

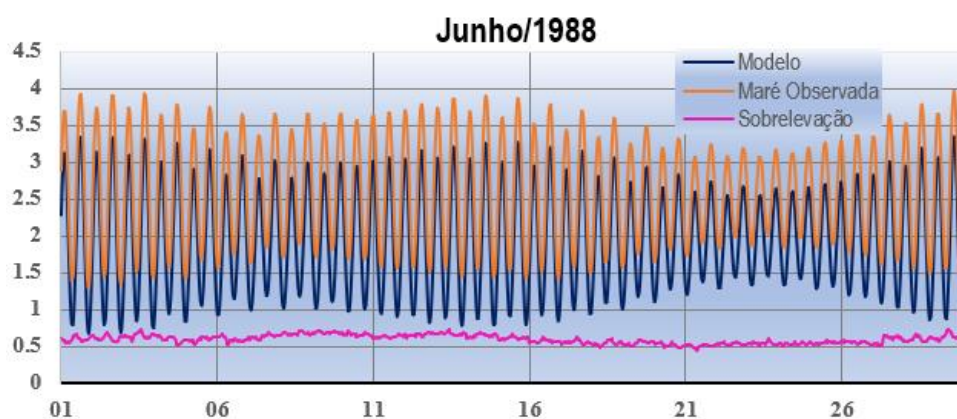
Os anos em questão apresentavam sobre-elevações na ordem de decímetros (ver exemplos: Fig 5, Fig 6 e Fig 7), contudo, por comparação do modelo de maré astronómica tal sobrelevação não é explicável a não ser com erros de referência vertical.



**Fig 5.** Gráfico mensal do Marégrafo de Lagos, do mês de Abril de 1988, com maré observada, maré modelada e sobre-elevação (em metros).

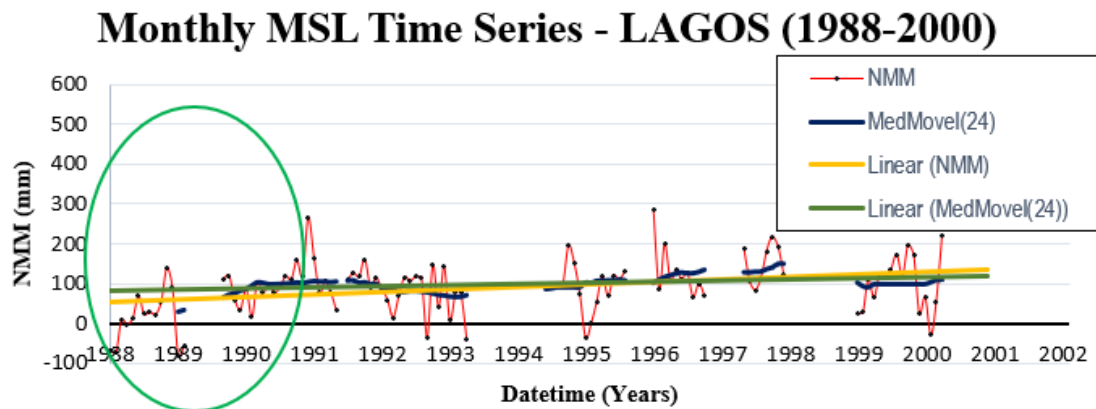


**Fig 6.** Gráfico mensal do Marégrafo de Lagos, do mês de Maio de 1988, com maré observada, maré modelada e sobre-elevação (em metros).



**Fig 7.** Gráfico mensal do Marégrafo de Lagos, do mês de Junho de 1988, com maré observada, maré modelada e sobre-elevação (em metros).

Foi efetuado um tratamento matemático restrito de forma a que a série voltasse a ter um comportamento mais realista. É possível observar na Fig 8 a série corrigida das anomalias detetadas.

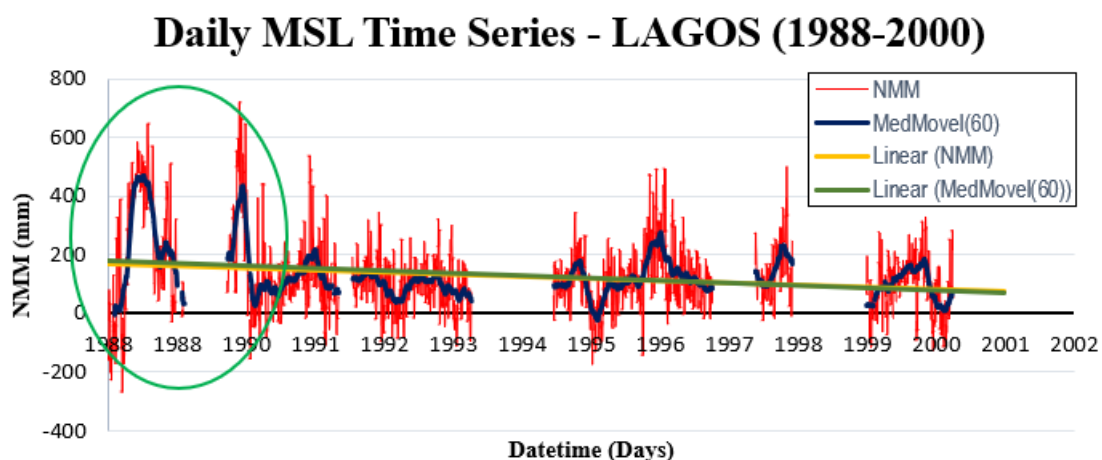


**Fig 8.** Série temporal do Marégrafo de Lagos de médias mensais, sobreposta com uma média móvel de 24 meses e respetiva regressão linear (corrigido das anomalias).

## 2.2 Séries Diárias

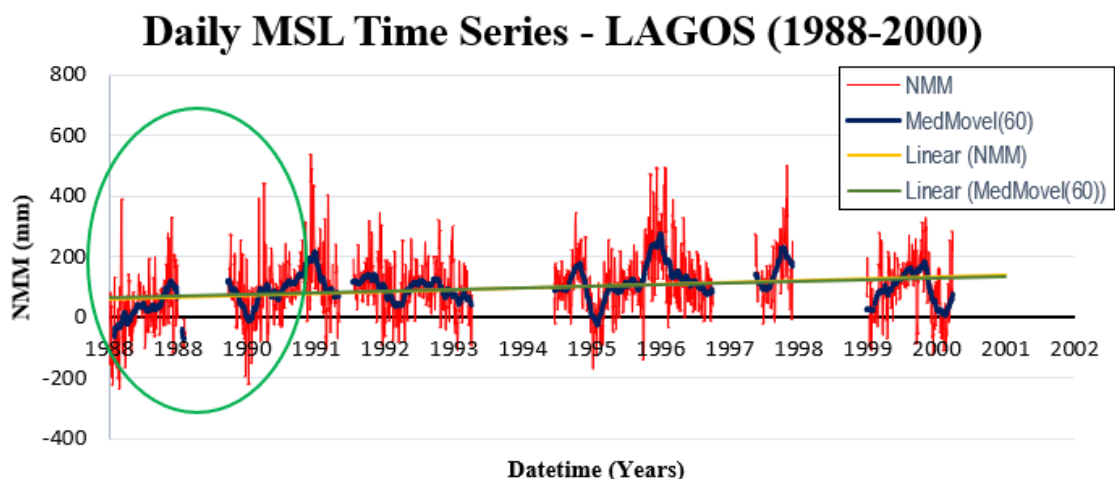
### 2.2.1 Série 1988-2000

O tratamento efetuado nesta série foi muito semelhante ao tratamento realizado na série mensal. Tal como foi dito anteriormente, os dados horários de maré foram divididos em várias folhas de cálculo de forma a ficarem organizados diariamente, mensalmente e anualmente. As anomalias anteriormente explicadas podem ser observadas, agora num contexto diário, na Fig 9 e a série devidamente corrigida na Fig 10.



**Fig 9.** Série temporal do Marégrafo de Lagos de médias diárias, sobreposta com uma média móvel de 60 dias e respetiva regressão linear (em milímetros).

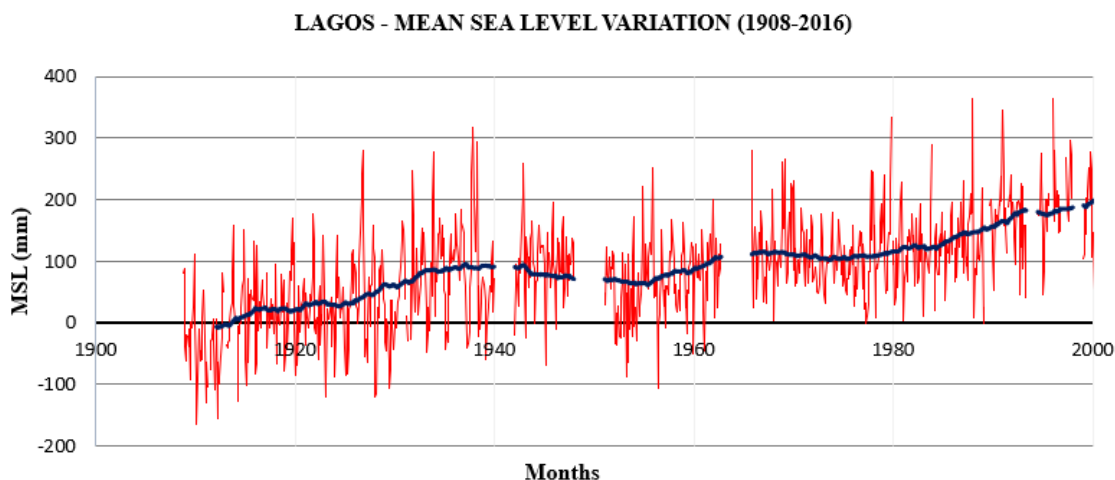




**Fig 10.** Série temporal do Marégrafo de Lagos de médias diárias, sobreposta com uma média móvel de 60 dias e respetiva regressão linear (em milímetros).

### 2.2.2 Série 1908-2000

Um dos principais objetivos foi unir as séries [1908:1987] e [1988:2000]. Através da comparação dos anos comuns entre as duas séries (1987 e 88) e de ajustamentos a nível de referencial global da série (NMM de 1908-1917), foi possível chegar ao seguinte gráfico (Fig 11):



**Fig 11.** Série temporal do Marégrafo de Lagos de médias mensais, sobreposta com uma média móvel de 24 meses e respetiva indicação do NMM no período 1908-2000 (em centímetros).

Portanto, a partir do gráfico acima é possível observar o quanto o NMM subiu no último século, em 90 anos, cerca de 20 cm, a uma taxa média de 2.2 mm/ano.

### 2.2.3 Série 2004-2016

Inicialmente esta série incluiria os anos de [2000:2003]. Este intervalo resultou de um processo de digitalização realizado a partir de imagens (raster) de maregramas disponibilizadas pelo departamento da Geodesia da DGT. No entanto ao efetuar a georreferenciação dos maregramas para este intervalo, observou-se que os anos em questão estavam demasiado incompletos e os dados existentes apresentavam vários problemas a nível técnico do marégrafo.

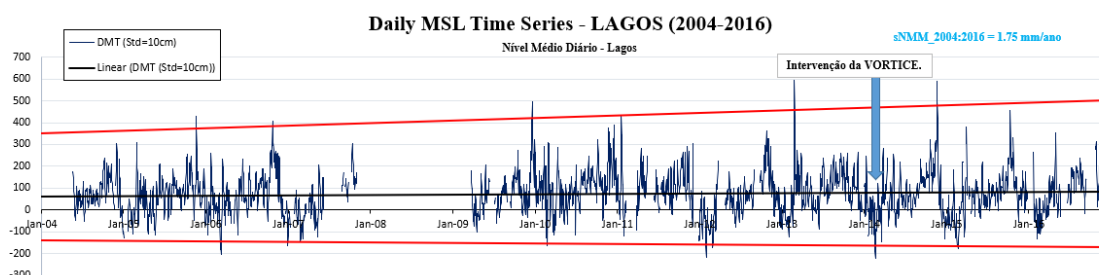
De forma a obter uma maior precisão dos dados diários referentes aos anos mais recentes, foram aplicadas 3 correções, a da velocidade vertical local, a da correção do EBI (Efeito Barométrico Inverso) e a da variação sazonal.

Com recurso às observações de nivelamento geométrico realizadas pelos serviços de Geodesia da DGT é possível indicar as correções de velocidade vertical relativas, ao qual podem ser aplicadas à série de dados do NMM diário observado (Tabela 1).

**Tabela 1.** Variação da altitude ortométrica da marca de nivelamento de referência do marégrafo acústico ( $\Delta H$  – variação anual da altitude;  $\Delta H/\Delta t$  – velocidade vertical anual em mm/ano).

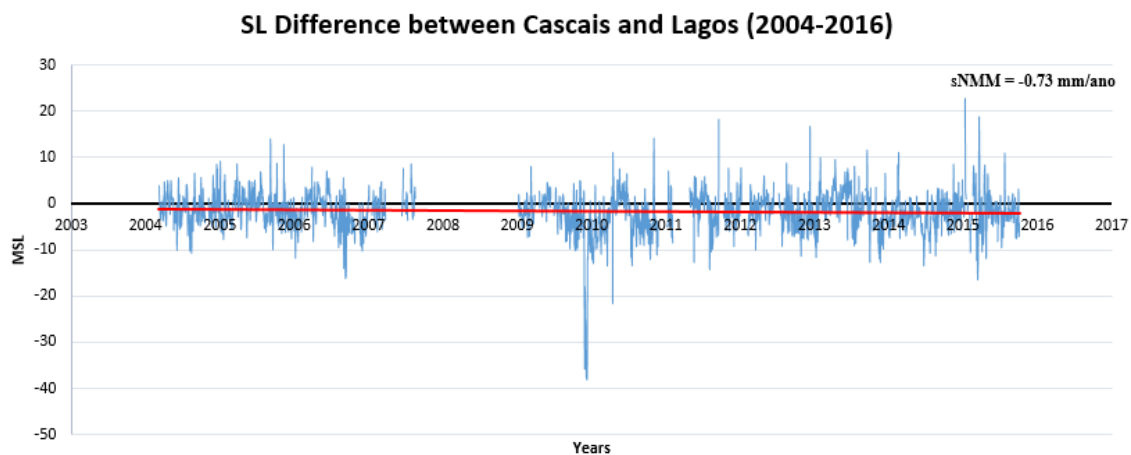
Years	2004	2006	2007	2014	2015	2016
H (m)	2.933	2.934	2.933	2.931	2.931	2.931
$\Delta H$ (mm)	-2.2	0.4	-0.6	-1.8	0.0	-0.2
$\Delta H/\Delta t$ (mm/year)	-0.20	0.18	-0.64	-0.26	-0.02	-0.25

A correção dos valores diários do NMM devido ao assentamento é realizada por ajustamento direto, com base nos valores de velocidade verticais anuais resultantes de nivelamento. Ao não se corrigir este erro, estaríamos a ser induzidos erros na da taxa de subida do NMM. O seguinte gráfico (Fig 12) é representado por valores médios diários de maré, apenas cor de efeitos de assentamento estrutural.



**Fig 12.** Série diária do NMM de Lagos (em metros e com DP de 10 cm), entre 2004 e 2015.

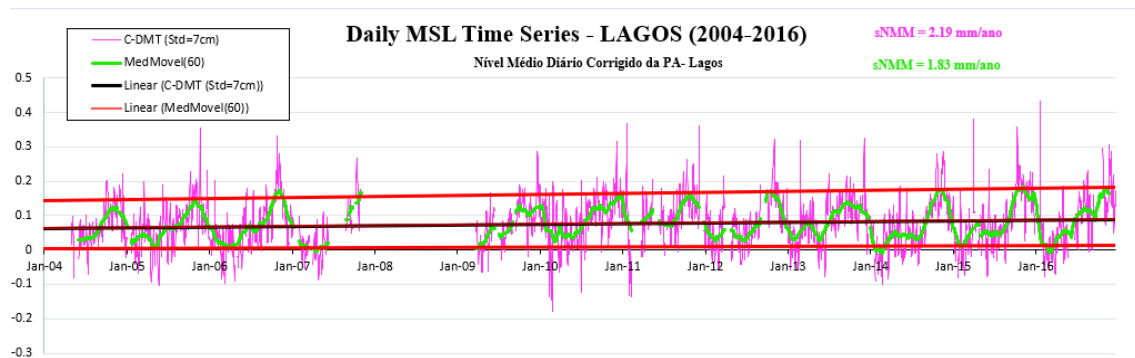
Os limites máximos e mínimos identificados acima, servem para identificar a tendência dos extremos da variação diária do NMM. Com essas linhas de tendência identifica-se o aumento de extremos máximos na variação do NMM correspondendo assim à ocorrência de temporais. A taxa de subida do NMM observada é de 1.75 mm/ano, que comparada a outras estações adjacentes para períodos semelhantes, demonstra estar subestimado. É possível observar na Fig 13 a diferença das respectivas séries do NMM entre os marégrafos de Lagos e Cascais.



**Fig 13.** Diferença do nível do mar entre Lagos e Cascais.

A figura acima representada diz-nos que a diferença do nível do mar entre Lagos e Cascais acentua-se ao longo do tempo. De modo a encontrar respostas a este problema recorreu-se a dados GPS e de tectónica. O GPS indica para Lagos uma taxa à volta de -0.5 mm/ano (subsidência), contudo, os dados de tectónica, a partir de várias pesquisas, fazem referência a um *uplift*.

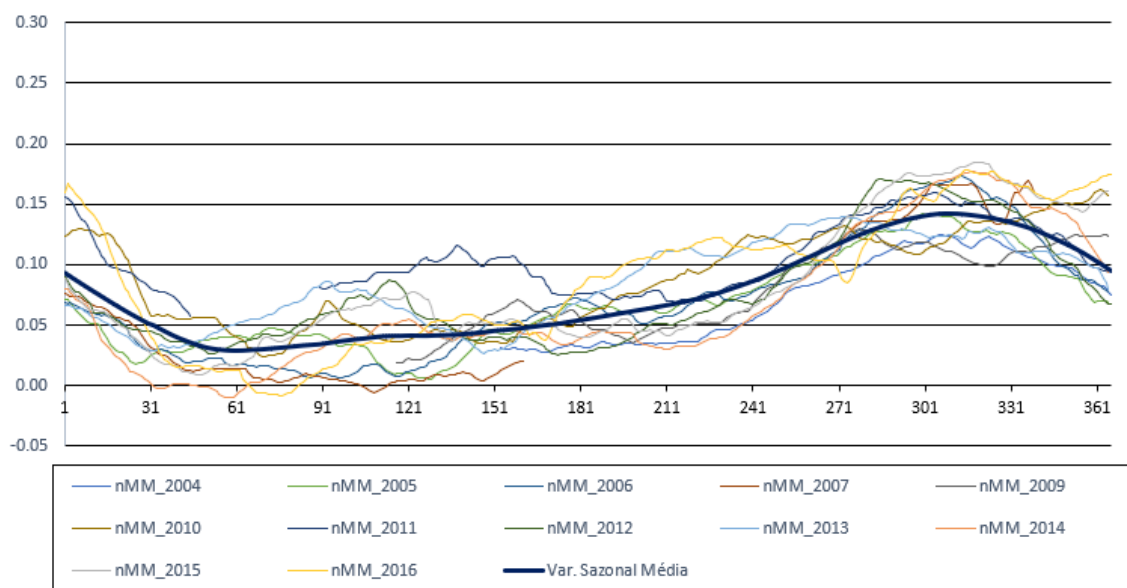
A próxima etapa passou pela correção do EBI. Inicialmente foi detetada uma deriva instrumental no barómetro digital do marégrafo, facto que causou uma sobrestimação de 1.46 mm/ano. Face a este sucedido e antes de ser possível qualquer retificação ou substituição dos valores de PA da série, assumiu-se o valor de pressão atmosférica, em relação ao qual é calculado o EBI, dado por uma média móvel de 2 anos em vez do valor médio global dos dados do barómetro do marégrafo de Lagos (Antunes, 2016). A seguinte figura (Fig 14) mostra a série de médias diárias do NMM corrigida da variação da PA.



**Fig 14.** Série diária do NMM de Lagos (em metros e com DP de 7 cm) corrigida do EBI e respetiva média móvel de 60 dias.

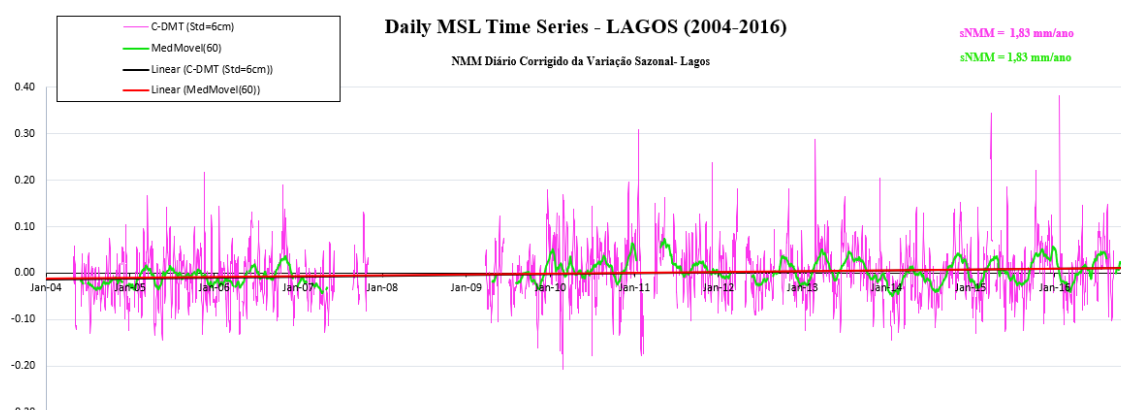
A média móvel de 60 dias sobreposta à série dá-nos a variação anual do NMM isenta das variações de curto período de forçamento de vento.

A última etapa passa pela correção da variação sazonal. A variação intra-anual do NMM apresenta um padrão de variabilidade, com a qual se podem observar os valores máximos no último trimestre de cada ano e valores mínimos de Maio a Julho. A variação sazonal da maré, nomeadamente, a componente harmónica anual da maré de influência solar (SA) é um parâmetro a ter em conta (Fig 15).



**Fig 15.** Variação sazonal (em metros) de 2003 a 2015 e variação média (negrito).

A Fig 15 mostra as variações sazonais dos últimos 12 anos, o que permite determinar a variação média sazonal do NMM. Ao remover esta variação sazonal média da média diária do NMM corrigida da PA, obtém-se uma série reduzida (Fig 16) próxima daquilo a que se pode chamar de variação eustática relativa.



**Fig 16.** 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.

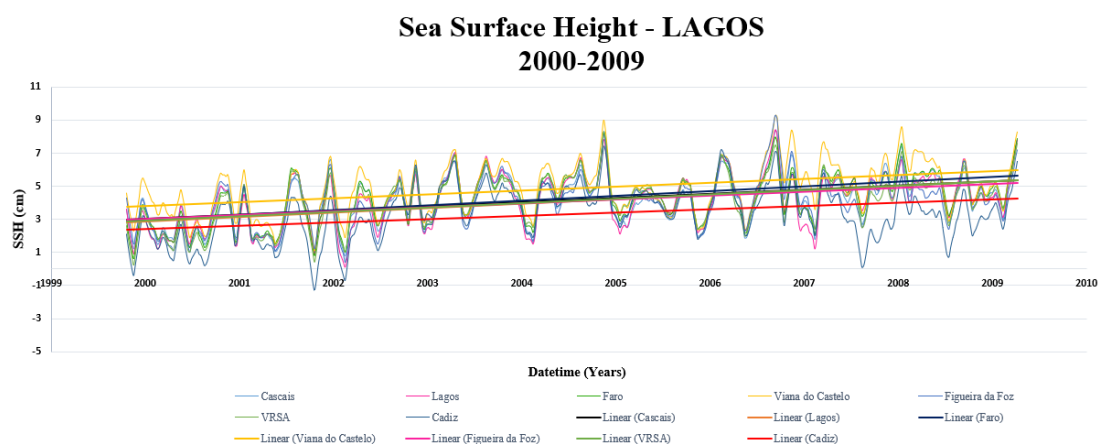
Esta série reduzida de variação do NMM apresenta uma variabilidade intra-anual significativamente mais reduzida, no entanto, a taxa de subida do NMM mantém-se inalterável com um valor de 1.83 mm/ano. Através da Tabela 2 é possível observar as taxas de subida do NMM e desvios padrão para todas as séries atrás referidas.

**Tabela 2.** Variabilidade (DP em cm) das séries de dados e Taxa de subida do NMM (mm).

Séries	DP Série(mm/ano)	Taxa sNMM (mm/ano)
Original	9.6	1.8
Corrigida	7.2	2.2
MM60_cor	4.7	1.8
Reduzida	5.8	1.8
MM60_red	2.3	1.8

Devido a esta contradição de resultados, acedeu-se à base de dados da PODAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) para obter dados relativos à elevação da superfície do mar (*Sea Surface Height*). A superfície média do oceano apresenta uma topografia, uma variação irregular, muito à imagem do que se observa num mapa topográfico. Estas variações podem ser mapeadas com uso a medições diretas (satélite) ou indiretas da elevação da superfície do mar relativas ao Geoide da Terra. Foram escolhidas várias localizações, ao longo da costa portuguesa, de modo a obter uma ideia mais clara do comportamento da superfície do oceano ao longo da costa Portuguesa e Sul de Espanha. O período utilizado foi, de acordo com os dados disponíveis o mais

próximo da série em estudo (Fig 17) pelo que as taxas apresentadas na Tabela 2 não fogem muito aos valores esperados.



**Fig 17.** Série temporal de elevação da superfície do mar (Viana do Castelo, Figueira da Foz, Cascais, Lagos, Faro, VRSA e Cadiz), entre o período de 2000 a 2009.

Através da figura acima representada e da Tabela 3 é possível observar um padrão comum entre as várias localizações, ou seja, se tivermos ao largo da costa portuguesa um valor médio de taxa de elevação da superfície do mar a rondar os 2.13 mm seria expectável observar em Lagos valores muito próximos deste.

**Tabela 3.** Taxas de variação da elevação da superfície do mar.

Local	Taxa (mm/ano)
Viana do Castelo	2.13
Figueira da Foz	1.83
Cascais	2.13
Lagos	2.13
Faro	2.43
VRSA	2.13
Cádiz	1.52

### 2.3 Análise Harmónica

A análise harmónica é um método que permite determinar as constituintes harmónicas e avaliar a série de sobrelevações meteorológicas, através da componente residual. Neste método é necessário definir as constituintes que modelam a maré, pelo que o critério a ter conta passa por utilizar-se as constantes com maior influência.

Um dos objetivos da análise harmónica passava por, após modelada a maré, obter os máximos de maré e de *stormsurge* (sobrelevação meteorológica). Ao mesmo tempo também permitiu detetar uma variedade de problemas nas séries 1986-2000 e 2004-2006 por inconsistências no comportamento dos resíduos, como mostra a Fig. 18.

Um dos principais problemas relacionados com a série 2004-2016, estava associado

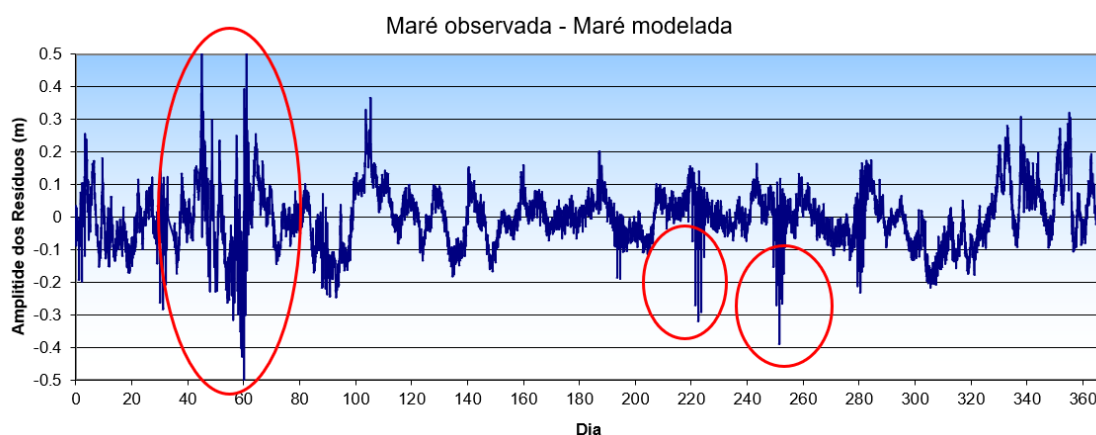


Fig 18. Resíduos obtidos no ajustamento da série de 2010 sem efetuar qualquer correção.

à instalação do equipamento e ao assoreamento do poço do marégrafo. Nomeadamente, durante um certo período as marés observadas que ultrapassam os 3.65m nem vão abaixo do 0.53 m. Este foi um problema que durou até 31 de Janeiro de 2014, altura em que a fornecedora do equipamento e calibração do marégrafo digital, de nome VÓRTICE, interveio e resolveu este problema específico. No entanto, é ainda desconhecido que tipo de ações foram efetuadas sabendo à partida eventuais correções necessárias nos dados passa por novas medições de maré, e eventualmente a calibração do aparelho, entre outros passos. Desconfia-se então que tal intervenção no aparelho possa ter contribuído para a subestimação da taxa de subida do NMM registada atualmente com esta série de dados.

Depois foram efetuadas outras séries de correções horárias que contribuíram para uma maior validação dos dados.

## **2.4 Campanha para colocação de sensores**

Foram efetuadas duas campanhas de observação de maré em três locais da costa do Algarve, Faro, Albufeira e Lagos, com o objetivo de validar a diferença de Nível Médio do Mar entre estes três locais.

A 1ª campanha decorreu entre o período de 26 de Março a 1 de Maio, no entanto, existiram alguns problemas que limitaram posteriormente o processamento e interpretação dos dados. O marégrafo de Lagos só trabalhou 7 dias neste período pelo qual veio a limitar o processo de verificação entre o sensor colocado e o marégrafo. O sensor colocado em Albufeira trabalhou durante 3 dias devido a problemas de bateria, no entanto, o IPMA disponibilizou dados para o mesmo período tendo em conta que possuem um marégrafo acústico no mesmo local e apenas os transdutores colocados em Faro e em Lagos funcionaram durante este período.

Tendo em conta algumas limitações existentes nesta primeira abordagem, foi organizada uma 2ª campanha em Setembro com vista à comparação e validação dos dados recolhidos na 1ª campanha.

Nesta 2ª abordagem em Lagos foram efetuadas medições de observação direta com uma sonda a partir de marcas de referência. Em Faro e Olhão também foram efetuadas observações diretas, mas desta vez em preia-mar e baixa-mar, com o objetivo de saber a diferença de altura de maré da barra para Faro e Olhão e tentar verificar se há, ou não, alterações no regime de maré.

Estes dados carecem de tratamento minucioso e dos dados da DGT que ainda não foram fornecidos por completo, bem como os de Albufeira por parte do IPMA, pelo que ainda estão em fase de processamento.



### 3 Conclusões

Uma das principais ilações a tirar deste estudo é que a taxa atual de subida do NMM em Lagos está subestimada, do qual se suspeitam problemas de carácter instrumental do marégrafo.

As séries mensais [1908-1987] e [1988-2000] foram tratadas e corrigidas de erros, permitindo a sua junção numa única série de médias mensais com uma subida de 19.8 cm do NMM relativo neste período de 90 anos estimada pela média móvel de 10 anos.

O acesso a documentação histórica do marégrafo de Lagos nos arquivos de Geodesia da DGT permitiu a correção de alguns dados relativamente ao nivelamento local. O recurso a maregramas antigos para usos de georreferenciação, permitiu também efetuar uma série de comparações entre os dados de várias fontes e o do próprio marégrafo. Neste último caso, os maregramas foram referenciados e digitalizados para os anos 2001, 2002 e 2003. Contudo, não foram acupulados à série diária do novo marégrafo devido à existência de imensas falhas nos dados.

A série mais recente (2004-2016), após a correção da velocidade vertical local, corrigida do efeito barométrico inverso e reduzida da variação sazonal, apresenta uma taxa discordante da subida do NMM proveniente das demais fontes de informação. Quer nas observações de satélite, quer nas observações de outros marégrafos da região, as taxas de subida do NMM rondam os 3 mm/ano. Existe alguma incerteza sobre o movimento vertical do local onde o marégrafo está instalado, ou seja, o GPS indica que Lagos encontra-se em subsidência com uma taxa de velocidade vertical da ordem de -0.5 mm/ano. Estudos de neotectónica, pelo contrário, indicam que existe um *uplifting* na costa sudoeste Algarvia.

A análise harmónica permitiu detetar e corrigir um conjunto de problemas relativamente às séries diárias 1986-2000 e 2004-2016. No caso da primeira série foi detetada uma sobrestimação na ordem dos 20 cm em algumas médias mensais dos primeiros anos. Na série 2004-2016 permitiu a correção de um problema que envolvia a omissão dos máximos e mínimos de marés em fases de Marés-Vivas. Com isto foi possível obter os máximos de maré e de sobrelevação para o período 1986-2016, embora ainda necessitem de validação mais detalhada.

As campanhas efetuadas para colocação de sensores, com o objetivo de corrigir e calibrar as medições obtidas do marégrafo de Lagos, permitem formular uma ideia sobre

os problemas que possam existir no marégrafo. Contudo, ainda é cedo para tirar conclusões visto que os dados carecem de tratamento mais detalhado.

Estava previsto também a criação de uma base de dados que implicaria um modelo sistemático de tratamento dos dados de maré. No entanto, o tempo não permitiu que esta tarefa fosse realizada tendo em conta os inúmeros problemas que os dados referentes ao marégrafo de Lagos proporcionaram.

## 4 Referências

- Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual. *4<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 21 a 23 de Junho de 2016.
- Permanent Service for Mean Sea Level. (2016, Janeiro 22). *Lagos*. Consultado em 2016, Outubro 17 em <http://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/162.php>.
- Physical Oceanography Distributed Active Archive Center. (2013, Junho 11). *Reconstructed Sea Level Version 1*. Consultado em 2017, Maio 22 em [https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/RECON\\_SEA\\_LEVEL\\_OST\\_L4\\_V1](https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/RECON_SEA_LEVEL_OST_L4_V1).
- University of Hawaii Sea Level Center. Joint Archive for Sea Level. (2010, Agosto 04). Consultado em 2016, Outubro 19 em <https://uhslc.soest.hawaii.edu/data/?rq>.