

Monitorização da Variação do Nível Médio do Mar

Carlos Antunes (1)

(1) LATTEX - IDL, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, cmantunes@fc.ul.pt.

Resumo: O recurso aos mais modernos marégrafos de radar ou de pressão, com ligação IP, permite uma monitorização em tempo real da variação do Nível Médio do Mar causada pelos diversos factores meteorológicos e oceânicos. O acesso por parte da FCUL aos marégrafos de Cascais e Lagos do IGP tem permitido o desenvolvimento de metodologias de análise da variação do NMM em tempo real e em pós-processamento com vista, por um lado, à avaliação da presumível subida do NMM causada pelas alterações climáticas e, por outro lado, monitorizar as sobre-elevações meteorológicas associadas a eventos de depressão atmosférica que atravessam o território nacional. Baseado no cálculo diário do nível médio da maré juntamente com a média da pressão atmosférica, uma série temporal com uma base de 10 anos de dados serve para avaliar a variação sazonal do NMM e a respectiva taxa de variação ao longo desse período. Consequentemente, esta metodologia viabiliza a estimativa da evolução da subida do NMM, com a determinação da presumível aceleração. A modelação de modelos numéricos feita com base na análise harmónica das marés permitiu obter modelos de precisão para a previsão de marés destes portos, com os quais é avaliada a sobre-elevação meteorológica em tempo real, por comparação da maré observada com a maré prevista. É apresentada nesta comunicação a metodologia de cálculo e análise, bem como, a abordagem da aplicação de monitorização da sobre-elevação em tempo real com envio automático de emails de aviso, em situações de risco, para o Instituto de Meteorologia e para a Protecção Civil.

Palavras-chave: Subida do Nível Médio do Mar, sobre-elevação meteorológica, análise harmónica de marés

1. INTRODUÇÃO

A actual infra-estrutura de marégrafos nacionais do Instituto Geográfico Português (IGP), de Cascais e Lagos, e a respectiva acessibilidade aos dados, via FTP, tem possibilitado um conjunto de análises sobre a variação do Nível do Médio Mar (NMM) na costa portuguesa.

O novo marégrafo de Cascais está a operar desde Novembro de 2003, com registo de elevações de maré, à taxa actual de 3 minutos, juntamente com a pressão atmosférica (PA) a uma taxa de registo de 10 minutos. Bem mais recente, em Março de 2009, o marégrafo de Lagos reiniciou a sua actividade na mesma configuração do marégrafo de Cascais; contudo, este vem apresentando alguns problemas de referência e calibração que têm inviabilizado a utilização sistemática dos seus dados. Por essa razão os resultados aqui apresentados referem-se todos ao marégrafo de Cascais

A existência de dois suportes FTP de dados, respectivamente, o armazenamento a *posteriori* e o envio de *streams* em tempo real, permite a análise dos dados em tempo real e em pós-processamento. Estes dois tipos de análise de dados contribuem de forma diferente para o estudo da variação do Nível do Mar (NM). O pós-processamento é usado, por intermédio das séries de médias diárias e mensais, para avaliar a subida do NMM às escalas decadal e secular; por outro lado, o processamento em tempo real é usado para avaliar instantaneamente a sobre-

elevação do NM causada por passagens de depressões atmosféricas, por vezes com os consequentes riscos naturais, nomeadamente, de galgamento, erosão, inundação e destruição de infra-estruturas das zonas costeiras e ribeirinhas.

2. MONITORIZAÇÃO DO NÍVEL DO MAR EM TEMPO REAL

A comparação directa da altura de maré observada instantaneamente com um modelo harmónico de maré preciso e exacto, conhecendo-se a PA, possibilita a avaliação rigorosa da sobre-elevação do NM causada por efeitos meteorológicos. Este é o princípio de funcionamento da monitorização em tempo real do NM.

2.1. Modelação harmónica da maré

Foram determinados modelos harmónicos de maré para os marégrafos de Cascais e Lagos, com base nos dados maregráficos horários de 2007 e 2006, respectivamente. Os modelos numéricos foram determinados por análise harmónica com recurso ao método dos mínimos quadrados (MMQ). O modelo adoptado de ajustamento das constituintes harmónicas locais (h_i , g_i) foi o método paramétrico, assumindo como valores iniciais aproximados os valores provenientes de modelos anteriores. Adicionalmente o valor da harmónica de grau zero, Z_0 (altura do NMM actual em relação ao ZH), foi

também ajustado aos dados, resultando um NMM relativo a ZH de 2,23 m em Cascais e 2,07 m em Lagos.

O elevado nível de precisão obtido nestes modelos deve-se à forma como foram corrigidos, por um lado, os efeitos meteorológicos da PA e do vento sobre a variação diária do NM, e por outro lado, a variação sazonal do NMM. Dado que a PA local é registada e faz parte dos dados do marégrafo, é possível corrigir os valores horários do efeito barométrico inverso (EBI) através da correcção, para o caso de Cascais:

$$y' = y - \frac{1019 - PA[mbar]}{100} \quad (1)$$

onde 1019 mbar é o valor médio da PA dos últimos 10 anos em Cascais e o factor 1/100 m/mbar (coeficiente do EBI) corresponde ao valor de correlação entre PA e o NMM.

Para o caso do vento, e na impossibilidade de se conseguir um modelo numérico adequado que produza bons resultados de causa/efeito, foi feita uma modelação numérica removendo das observações o campo residual de tendência. Finalmente, a componente sazonal do NMM (Figura 1) foi modelada com base na série de dados de médias diárias (Figura 2) e sobreposta à constituinte harmónica SA (solar anual), considerada no modelo matemático como variável dependente do sistema.

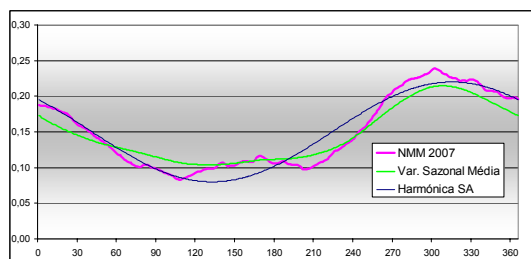


Fig. 1. Variação sazonal média do NMM de Cascais, NMM de 2007 e modelação da componente harmónica SA.

O modelo de maré astronómica resultante, quando comparado diariamente com a maré observada, apresenta uma precisão média diária na ordem dos 2 cm e uma exactidão média, a menos do efeito de sobre-elevação atmosférica, superior a 5 cm.

2.2. Monitorização em tempo real

A aplicação computacional desenvolvida neste âmbito, MareVB V2.5, através de uma ligação FTP (*sock.RemoteHost = IP*) ao marégrafo seleccionado, recebe duas linhas de informação (*streams*) que contêm, respectivamente, dados de elevação de maré (*Sensor 6: Water level*) e de PA (*Sensor 2: Air Pressure*) medidos pelos sensores do marégrafo. A aplicação converte a elevação em altura e compara-a com o valor do modelo de previsão de alturas de maré; da diferença resulta a sobre-elevação do NM. Com o valor da PA, remove o EBI e calcula a componente residual da sobre-elevação causada

pelos restantes efeitos meteorológicos e oceânicos.

Em função da amplitude da sobre-elevação do NM e com base em níveis predefinidos, a aplicação emite avisos automáticos de alerta (Amarelo, Laranja e Vermelho), via *email*, para o Instituto de Meteorologia e para a Protecção Civil, registando em ficheiro (*Email_data.log*) todos os eventos ocorridos durante o dia.

Com base na oscilação de ondas de *seicha* (calema) provocadas por forte agitação marítima, a aplicação avalia, através de um simples filtro linear, o estado do mar em “Encrespado”, “Agitado” e “Tempestuoso”, e em caso extremo, de “Grande Vaga”. Em caso de estado do mar Agitado e Tempestuoso são também enviados avisos de alerta.

A eventual ocorrência de uma onda de longo período e de grande amplitude, do tipo de *Tsunami*, será classificada simultaneamente de Grande Vaga, no início da ocorrência, e de sobre-elevação de nível de alerta Vermelho, durante todo o período de ocorrência (caso o equipamento se mantenha operacional).

Os níveis de alerta extremos estão associados não só à elevada amplitude de sobre-elevação, mas também aos níveis extremos de preia-mar e marés-vivas, que quando sobrepostos, correspondem a níveis extremos de inundação e galgamento. Todos os dados e eventos são armazenados em ficheiros para posterior verificação e como forma de salvaguarda dos dados e respectiva análise.

A aplicação MareVB 2.5 procede ainda à emissão de um aviso automático de alerta para o IGP quando o marégrafo deixa de enviar dados em tempo real, por causa de uma qualquer falha no sistema ou na internet.

3. MONITORIZAÇÃO DECADAL DO NMM

Diariamente são descarregados os dados do sítio de FTP público do IGP e é feito um processamento e análise de dados, com vista à determinação do NMM diário, à determinação de sobre-elevação meteorológica e à actualização dos dados e respectiva estatística de controlo e análise.

3.1. Série temporal do NMM diário

A média do NM calculada diariamente é adicionada à respectiva série temporal, com uma base de 10 anos de dados, de forma a possibilitar o estudo da variação sazonal e decadal do NMM. De igual forma são também calculadas as médias mensais, a acrescentar à série secular da variação do NMM, que no caso de Cascais se inicia no ano de 1882.

Dada a variação decadal do NMM provocada por efeitos ainda pouco conhecidos, nomeadamente o forçamento atmosférico, a tendência de variação da subida/descida do NMM é apenas possível por aplicação de operadores lineares de longo período, por exemplo, a média móvel de período de 10 a 20

anos. Estes operadores lineares de remoção de variações de curto período, por suavização, não permitem avaliar rigorosamente a variação actual do NMM. Por essa via, será necessário esperar por mais 10 anos de dados para se obter a taxa actual de subida do NMM. Nesse sentido, foi desenvolvida uma metodologia que viabiliza, embora com maior incerteza, a taxa de variação actual do NMM.

Conhecido o EBI sobre a superfície livre do mar, cujo valor teórico é de -1 cm/mbar, a série temporal de médias diárias pode ser corrigida desse efeito usando o respectivo valor médio da PA. A série temporal resultante (média diária corrigida) apresenta menor variabilidade, e por isso, mais estável no que diz respeito à determinação da taxa média de subida do NMM. Sobre esta série temporal é então corrida uma média móvel de 60 dias, obtendo-se uma curva que mostra claramente a variação sazonal do NMM, e que, através de uma regressão linear, resulta uma taxa média actual da subida do NMM. A Figura 2 mostra esta série temporal do Marégrafo de Cascais e a respectiva média móvel de 60 dias com a variação sazonal, cuja causa principal é o forçamento de regime de vento que assola a costa atlântica portuguesa (Relvas *et al.*, 2007).

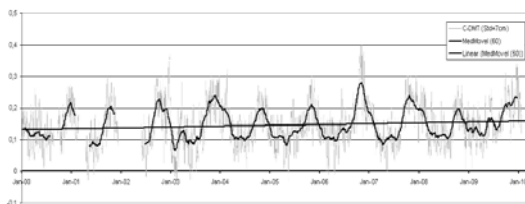


Fig. 2. Série temporal do Marégrafo de Cascais de médias diárias corrigidas, sobreposta com uma média móvel de 60 dias e respectiva regressão linear (em metros).

Desta série de 10 anos de base extrai-se a taxa actual de subida do NMM, a partir da média móvel de 60 dias, com o valor de 2,6 mm/ano, para o período de 2000 a 2009, e uma incerteza de $\pm 0,3$ mm/ano.

3.2. Monitorização em pós-processamento

O acesso *a posteriori* aos dados armazenados do marégrafo, via FTP público, permite um variado conjunto de possíveis análises. Os dados armazenados em ficheiros horários são convertidos, concatenados e processados, resultando ficheiros diários com valores horários e, médias diárias de NMM e PA posteriormente acrescentadas às séries temporais (exemplo da Figura 2).

Estes dados servem depois para reproduzir gráficos diários e mensais, onde se insere a curva da maré observada versus maré prevista, adicionada da curva de sobre-elevação.

Sobre os valores de médias diárias é determinada a sobre-elevação média diária, em relação ao NMM actual, causada quer apenas pelo efeito da PA, quer pelo forçamento atmosférico total (vento mais PA).

Estes valores de sobre-elevação são depois categorizados e contabilizados, resultando numa simples análise estatística de frequência e período de retorno.

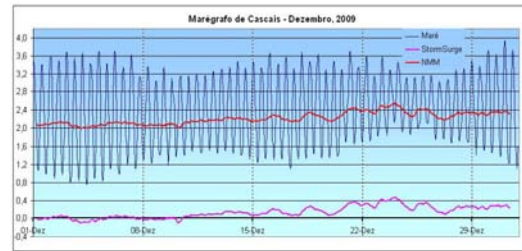


Fig. 3. Gráfico mensal do Marégrafo de Cascais, do mês de Dezembro de 2009, com maré observada, variação do NMM e sobre-elevação (em metros).

As sobre-elevações extremas estão sempre associadas à ocorrência de temporais, pelo que esta estatística reproduz, em si, também a estatística de temporais que atravessam a região. Particularmente, neste último inverno, nos meses de Dezembro (Figura 3) e Fevereiro verificaram-se níveis extremos muito pouco frequentes. A 23 de Dezembro pelas 3:00, observou-se uma sobre-elevação horária em Cascais de 50 cm (em relação ao NMM actual, e de 72 cm em relação ao NMM de Cascais de 1938). A sobre-elevação média mensal do mês de Dezembro em Cascais foi de 31,3 cm acima do NMM de Cascais de 1938, e a de Fevereiro de 33,7 cm. Este último foi o segundo maior valor de sempre, desde 1882, a seguir ao valor máximo alcançado em Dezembro de 1989, com 34,5 cm. Um outro valor extremo, alcançado neste inverno, foi a máxima altura de maré ocorrida a 2 de Março em Cascais, com o valor de 4,28 m, pelas 3:20 da manhã.

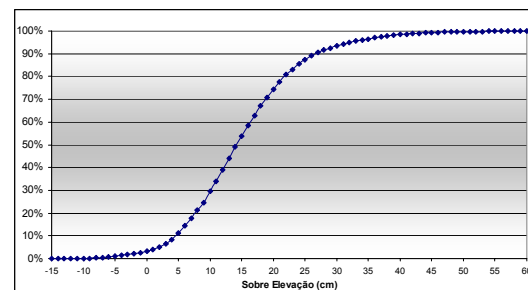


Fig. 4. Curva do percentil de sobre-elevações do marégrafo de Cascais, relativo ao NMM de Cascais de 1938.

A Figura 4 mostra o gráfico de percentil de sobre-elevações registadas em Cascais desde Janeiro de 2000. Neste gráfico pode-se verificar que 90% das sobre-elevações são inferiores a 26 cm, ou seja, apenas 10% das sobre-elevações são superiores a 26 cm e apenas 5% são superiores a 32 cm. No gráfico da Figura 5 verifica-se que as sobre-elevações correspondentes a esses percentis ocorreram maioritariamente entre 2009 e 2010, ou seja neste último inverno, no período de Dezembro a Março.

Estes dados revelam a severidade das tempestades ocorridas neste último inverno, tal como é conhecido, quando comparado com os restantes anos da presente década.

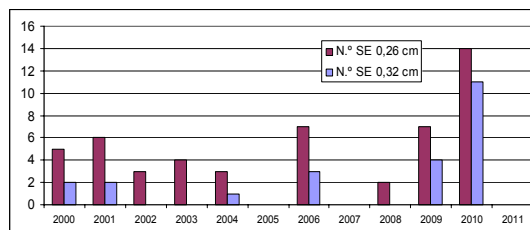


Fig. 5. Número de ocorrências de sobre-elevação correspondente aos percentis de 90% e 95%, respectivamente, de 26 e 32 cm, relativo ao NMM de Cascais de 1938.

4. ACELERAÇÃO DA SUBIDA DO NMM

A actual taxa de subida do NMM relativa em Cascais de 2,6 mm/ano, quando comparada com a respectiva taxa de 2,1 mm/ano correspondente às últimas duas décadas do século XX (Antunes and Taborda, 2009), induz um cenário de aceleração da subida do NMM, com um valor na ordem 2,6 mm/ano² ($\pm 1,5$ mm/ano²).

Assumindo estes valores de taxa de subida do NMM e respectiva aceleração, pode-se projectar, de uma forma simples, a evolução da subida do NMM relativa para Cascais. A Figura 6 mostra essa projecção, sobrepondo a curva do NMM registada desde 1970 com a curva da projecção futura, para o período de 2000 a 2050, e respectivas linhas limites, máxima e mínima, para uma confiança de 95%.

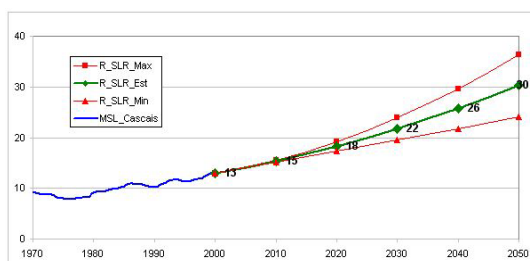


Fig. 6. Projecção da evolução da subida do NMM relativa, para Cascais, com base nos valores actuais de taxa de subida do NMM e respectiva aceleração.

Estudos recentes, através da análise de séries temporais de posicionamento GPS da estação permanente de Cascais, indicam um movimento vertical absoluto em Cascais situado abaixo de 0,5 mm/ano, implicando uma subida do NMM absoluta na ordem dos 3 mm/ano. O valor de velocidade vertical de 0,5 mm/ano é corroborado por estudos de neotectónica de Portugal continental, que indicam um *uplift* de longo período na ordem de 0,1 mm/ano (Cabral, 1995), e por um reajustamento isostático pós-glacial praticamente nulo segundo o modelo ICE-5G (Peltier, 2004).

Estes resultados, subida do NMM absoluta e respectiva projecção, são concordantes com o que é advogado pelo relatório do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC, 2007) e outras publicações de referência (Church and White, 2006; Rahmstorf, 2007). Este facto, em nossa opinião, demonstra a qualidade dos dados do marégrafo de Cascais, um dos mais antigos a operar em permanência, bem como, a sua importância no estudo da evolução da subida no NMM devido às alterações climáticas.

Agradecimentos

Agradece-se ao IGP pela acessibilidade e disponibilidade dos dados dos marégrafos de Cascais e Lagos. Um agradecimento especial aos vários alunos do Mestrado de Engenharia Geográfica da FCUL que colaboraram no desenvolvimento da aplicação de monitorização de marégrafos e na determinação dos modelos de análise harmónica de marés.

REFERÊNCIAS

- Antunes, C. and Taborda, R. (2009). Sea level at Cascais Tide gauge: data, analysis and results. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (Proceeding of the 10th International Coastal Symposium), 218-222.
- Cabral, J. (1995). *Neotectónica em Portugal Continental*. Memórias do Instituto Geológico e Mineiro 31, IGM.
- Church, J.A. and White, N.J. (2006). A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research letters*, Vol. 33, Issue 1, L10602, 1-4.
- IPCC, 2007: Climate Change (2007). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Peltier, W.R. (2004). Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE, Invited Paper, *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 32, 111-149.
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315, 368-370.
- Relvas, P., Barton, E.D., Dubert, J., Oliveira P. B., Peliz, A., da Silva J.C.B and Santos, A. M. P. (2007). Physical Oceanography of the Western Iberia Ecosystem: latest views and challenges. *Progress in Oceanography*, 74(2-3), 149-173.