

Caracterização da sobrelevação meteorológica em Cascais nos últimos 50 anos

Autores: R. Vieira (1), C. Antunes (2) e R. Taborda (2)

(1) Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa; avieira@fc.ul.pt.

(2) IDL – Universidade de Lisboa

Resumo: A contribuição dos processos físicos de origem atmosférica que provocam uma alteração no nível do mar relativamente à maré astronómica é designada por sobrelevação meteorológica (SM). Neste trabalho foi analisado o registo horário da maré de Cascais entre 1960 e 2010 e caracterizado a SM ao nível da frequência e da amplitude. A análise do período de retorno dos extremos de SM foi realizada através da distribuição de Gumbel simples. Os resultados obtidos evidenciam uma ligeira tendência de aumento, quer relativamente à amplitude máxima quer à frequência de SM. Estes resultados, isentos do efeito da subida do NMM e das variações inter-anuais, estão de acordo com os obtidos em estudos anteriores realizados em Portugal e noutros países. Contudo, uma vez que este estudo incide sobre um período mais alargado de dados, os resultados aqui apresentados evidenciam, em relação aos trabalhos anteriores, períodos de retorno mais curtos para os mesmos valores de SM extrema.

Palavras chave: sobrelevação meteorológica, marégrafo de cascais, períodos de retorno, Gumbel simples

1. INTRODUÇÃO

A sobrelevação meteorológica (SM) corresponde à contribuição dos processos físicos de origem atmosférica que provocam uma alteração no nível médio do mar (NMM) relativamente ao nível previsto. Esta grandeza é calculada através da diferença entre a maré observada e a maré astronómica, reconstituída pela análise harmónica dos registos de maré disponíveis.

Quando a ocorrência de um episódio de SM positivo coincide com a preia-mar de águas vivas pode originar episódios extremos de inundações das zonas costeiras cuja magnitude depende das especificidades geográficas de cada região (Gaslikova *et al.*, 2011; Troccoli *et al.*, 2011; Hallegatte *et al.*, 2011; Dasgupta *et al.*, 2011; Shepard *et al.*, 2012).

Em Portugal, segundo Andrade *et al.* (2006), a SM foi considerada, até ao início da década de 90, como um elemento forçador de importância menor, de ordem centimétrica a decimétrica, tendo o estudo pioneiro de Morais e Abecassis (1978) referido o valor de 0.53 m. Até início da década de 90 apenas alguns trabalhos incluíram estimativas deste efeito baseadas em modelos simples de “barómetro invertido” (efeito barométrico inverso) e utilizadas apenas como coeficiente de segurança na avaliação de cotas máximas alcançáveis pelas ondas em regime de temporal (Andrade *et al.*, 2006).

O primeiro estudo sistemático do fenómeno foi realizado por Taborda e Dias (1992), que caracterizaram a SM em duas tempestades, relatando a ocorrência de valores de sobrelevação superiores a 1 m, em Viana do Castelo e Aveiro, demonstrando que este valor era suficiente para potenciar e

produzir importantes acções erosivas, destruição de construções ou obras costeiras e inundações na zona litoral. Os trabalhos de Carvalho (1999) confirmaram a magnitude deste fenómeno na costa ocidental Portuguesa. Recentemente, em Andrade *et al.* (2006), foram analisados dados do marégrafo de Cascais entre 1987 e 2000, tendo chegado a um valor máximo de 0.6 m associado à passagem de depressões extensas e muito cavadas.

Este estudo teve como principal objectivo caracterizar a sobrelevação meteorológica em Cascais através da análise de uma série maregráfica com 50 anos (1960 – 2010). Esta análise permitiu não só ampliar a janela de cálculo utilizada em trabalhos anteriores mas também identificar, pela primeira vez, eventuais tendências de evolução.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho, foram analisados todos os registos horários de SM superiores a 10 cm observados no marégrafo de Cascais entre 1960 e 2010, incluindo os dados adquiridos pelo novo marégrafo digital, a operar desde 2003. Estes registos foram caracterizados no que diz respeito à frequência e amplitude. Os registos referentes aos anos de 1963, 1970 e 2000 não foram utilizados por não haver dados ou por apresentarem lacunas superiores a 50% das observações válidas.

A maré astronómica foi obtida por análise harmónica, através de um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), aplicado aos dados de registo de alturas horárias de maré, seguindo a metodologia apresentada em Antunes (2011), sem que tenham sido removidos, dos dados, qualquer efeito de forçamento atmosférico, de pressão

atmosférica ou vento. Desta forma, os resíduos do ajustamento correspondem, com suficiente exactidão, à série anual de SM. Sobre esta série de resíduos é então aplicada a metodologia de análise de SM.

Neste estudo foram consideradas para análise, a frequência relativa da SM e as amplitudes máximas para cada ano do período estudado. A frequência relativa foi calculada através da razão entre número de ocorrências de SM superiores a 10 cm e o número total de registos horários de maré desse ano.

Dado que o NMM (um parâmetro do modelo dos MMQ correspondente à harmónica de grau zero) é estimado para cada ano de dados, as estimativas da SM ficam isentas da variação do NMM e das variações inter-anuais, que se podem associar à Oscilação do Atlântico Norte (NAO). Este facto é importante pois poderá justificar diferenças, na ordem de 5-10 cm ou superior, entre os resultados das SM horárias estimadas neste estudo e as de outros estudos anteriormente realizados.

A análise do período de retorno para a frequência e amplitude máxima da SM foi efectuada utilizando a distribuição de Gumbel simples para valores extremos (Al-Mashidani *et al.* 1978). A identificação de eventuais tendências no período de retorno baseou-se na técnica de partição do intervalo de dados, designada bootstrapping (Davison e Hinkley, 1997), que consiste numa análise sucessiva com diminuição progressiva do intervalo de análise, convergindo sucessivamente para períodos mais recentes, i.e., foram analisados diferentes períodos de retorno através do método de Gumbel para os intervalos sucessivos de 1960-2010, 1970-2010, 1980-2010 e 1990-2010.

3. RESULTADOS

3.1. Frequência dos eventos de sobrelevação meteorológica

Com o objectivo de identificar eventuais tendências na frequência da SM, a série de ocorrências anuais foi filtrada através da aplicação de uma média móvel com janela de 10 anos, sobre a série de percentagem de frequência anual. Na Fig.1 apresenta-se a série de frequências anuais de SM, sobreposta da média móvel centrada (a tracejado), com período de 10 anos, e respectiva regressão linear. Os resultados indicam uma tendência de aumento da frequência de eventos de SM, muito mais evidente a partir de meados da década de 70, com uma oscilação periódica, entre os 15 e os 20 anos (curva da média móvel centrada).

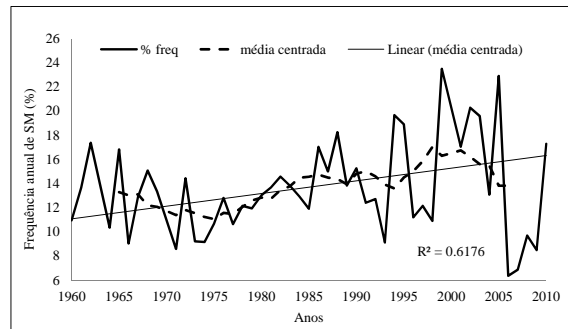


Fig. 1. Frequência anual da SM registada no período compreendido entre 1960 e 2010 em Cascais, respectiva média móvel com período de 10 anos e regressão linear.

A Tabela I apresenta a estatística da série temporal de frequências anuais de SM para o período em análise. Da sua análise, contata-se que 10% dos anos estudados têm uma frequência relativa acima do normal, superior a 19% (percentil 90). Isto significa que para um período de 50, apenas 5 anos se tem uma frequência superior a 69,4 dias (1664 horas) com SM superior a 10 cm.

Tabela I. Estatística relativa à frequência anual de SM registada no marégrafo de cascais, entre 1960 e 2010.

Parâmetro	(%)
Máximo	24 (1999)
Média	14
Mínimo	7 (2007)
Desvio-padrão	3.8
Percentil 50%	13
Percentil 90%	19
Percentil 95%	20

Os períodos de retorno para a frequência da SM calculados pelo método de Gumbel e para sucessivos períodos (*bootstrapping*), estão representados na Fig.2.

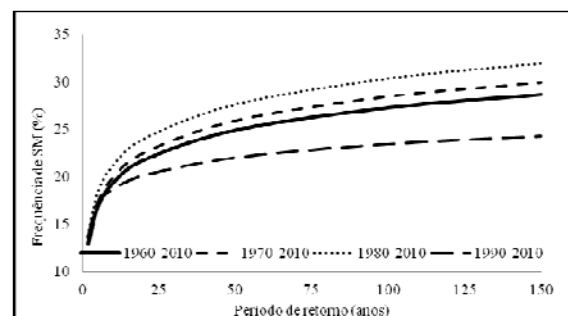


Fig. 2. Distribuição de Gumbel aplicada à percentagem de ocorrências de SM até um período de retorno de 150 anos, considerando 4 janelas temporais diferentes: 1960-2010, 1970-2010, 1980-2010 e 1990-2010.

Os resultados obtidos através da análise de *bootstrapping* estão de acordo com os obtidos através da análise da tendência até ao final da década

de 1990, uma vez que analisando as janelas temporais sucessivamente, de 1960-2010, 1970-2010 e 1980-2010, os períodos de retorno associados a frequências idênticas são progressivamente menores, ou seja, verifica-se um aumento de frequência para os mesmos períodos de retorno, á excepção do período mais recente, de 1990-2010 (curva inferior da Fig. 2). Este facto deve-se à tendência de diminuição de frequência de SM a partir de 2000, tal como se verifica no gráfico da série temporal (Fig. 1).

3.2. Amplitude máxima dos eventos de sobrelevação meteorológica

Tal como para a frequência, com o objectivo de remover as oscilações anuais, foi corrida uma média móvel para um período de 10 anos sobre a série de amplitudes máximas de SM observadas entre 1960 e 2010 (Fig.3). Identificou-se uma ligeira tendência de aumento da amplitude máxima anual de SM, com um coeficiente de determinação de 0.31. Contudo observa-se uma flutuação em torno da linha de tendência, tal como é também verificado no gráfico da frequência anual (Fig. 1), o que indicia algum mecanismo de oscilação de longo período, inter-anual/decadal.

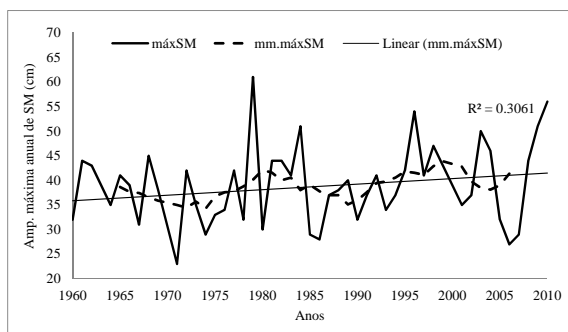


Fig. 3. Série de amplitudes máximas de SM registadas no período compreendido entre 1960 e 2010 em Cascais, respectiva média móvel com um período de 10 anos e regressão linear.

Tabela II. Estatística relativa à amplitude máxima anual de SM registada no marégrafo de cascais, entre 1960 e 2010.

Parâmetro	(cm)
Máximo	61 (1979)
Média	39
Mínimo	23 (1971)
Desvio-padrão	8.0
Percentil 50%	39
Percentil 90%	50
Percentil 95%	53

Da análise da Tabela II contata-se que 10% dos anos estudados têm apresentam uma amplitude máxima acima do normal, superior a 50 cm (percentil 90).

A análise do período de retorno para a amplitude máxima de SM foi feita de forma semelhante à análise de frequência de SM, recorrendo à distribuição de Gumbel simples para valores extremos e à análise de *bootstrapping*. Os resultados obtidos estão representados na Fig.4 e são equivalentes aos da frequência, verificando-se amplitudes máximas sucessivamente mais elevadas, para os mesmos períodos de retorno, quando analisadas apenas as 3 últimas décadas.

Através da análise de *bootstrapping* sobre a amplitude máxima de SM, e à semelhança do que se observa para as frequências, embora menos evidente, também se pode concluir que períodos de dados mais curtos e mais recentes indicam amplitudes mais elevadas para o mesmo período de retorno, o que equivale a períodos de retorno mais curtos para as mesmas amplitudes.

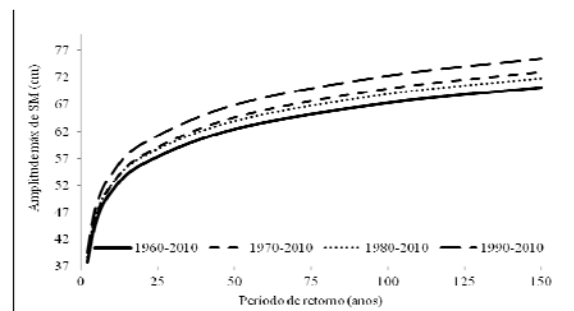


Fig. 4. Distribuição de Gumbel aplicada à amplitude máxima de SM até um período de retorno de 150 anos, considerando a análise de bootstrapping para 4 períodos de dados diferentes: 1960-2010, 1970-2010, 1980-2010 e 1990-2010.

4. CONCLUSÕES

Da análise da Fig.4, e considerando a curva inferior correspondente ao período alargado de dados, de 1960-2010, extraem-se as amplitudes máximas de 58, 62 e 67 cm para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente.

Os resultados aqui obtidos, isentos do efeito da subida do NMM e das variações inter-anuais, são ligeiramente superiores aos reportados em estudos anteriores (Andrade *et al.*, 2006), na ordem dos 10 cm. A ligeira tendência de aumento de frequência e de amplitude máxima de SM observada é compatível com os resultados obtidos noutros países (Gaslikova *et al.*, 2011; Shepard *et al.*).

Os resultados publicados no âmbito do projecto SIAM II (Andrade *et al.*, 2006) indicam uma previsão de amplitude máxima de SM de 50, 54 e 58 cm para períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente, utilizando os dados de apenas 13 anos, entre 1987 e 2000. Para um período idêntico,

embora ligeiramente mais alargado e com dados mais recentes, de 1990-2010 (Fig.4), obtiveram-se valores superiores, de 61, 67 e 72 cm, respectivamente. Esta diferença é justificada pelo período da série (Fig.3) estudado no trabalho publicado anteriormente apresentar valores máximos de SM mais baixos, relativamente ao resto da série, com apenas um extremo de 54 cm (em 1996) e os restantes abaixo dos 50 cm.

Da análise dos resultados da aplicação da técnica de *bootstrapping*, conclui-se que para as séries de dados mais recentes e mais curtas, são estimados períodos de retorno mais curtos para a mesma amplitude de SM máxima, ou de outra forma, são estimadas maiores amplitudes de SM máxima para o mesmo período de retorno.

Na análise da Fig.3, observa-se ainda uma oscilação de longo período sobre a série da média móvel, indicando uma flutuação inter-anual/decadal, que justifica, em parte, esta tendência observada no comportamento da amplitude máxima de SM nas décadas mais recentes, evidenciada por via da técnica de *bootstrapping*. Estes resultados significam que, no curto prazo, em particular nas próximas duas décadas e devido a esta oscilação inter-decadal, a tendência de subida de valores extremos de amplitude de SM detectada no passado recente poderá não se vir a verificar. Podendo mesmo, vir a verificar-se uma tendência de sinal inverso, como a que se observa no gráfico da distribuição Gumbel para a série de frequências de SM, como forma de compensação e correção causada pelo efeito desta oscilação inter-anual/decadal.

Todas as análises indicam, no médio-longo prazo, uma ligeira tendência de aumento dos valores observados de frequência e amplitude máxima de SM. No entanto, e apesar da ligeira tendência verificada nas últimas décadas, não é expectável que no futuro se verifiquem amplitudes de SM muito superiores às observadas neste período de estudo, não só porque a curva da distribuição de Gumbel indica uma taxa de inclinação muito pequena, inferior a 0.16% (correspondente a um aumento aproximado de 0.10 cm/ano) para lá do período de retorno de 50 anos; mas também, devido à implausibilidade que as variações no forçamento oceanográfico e meteorológico, relacionadas com as alterações climáticas, possam, significativamente, alterar o clima de sobrelevação actual.

REFERÊNCIAS

Al-Mashidani, G., Pande, A., B. L., Mujda, M. F. (1978). A simple version of Gumbel's method for flood estimation. *Hydrological Sciences*, 23(3): 373-380.

Andrade, C., Freitas, M. C., Cachado, C., Cardoso, A., Monteiro, J., Brito, P. e Rebelo, L. (2002).

Coastal Zones. In: Santos, F.D., K. Forbes and R. Moita, (eds.) *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*, Gradiva, Lisboa, pp. 173-219.

Andrade, C., Pires, H. O., Silva, P., Taborda, R. e Freitas, M. C. (2006). Zonas Costeiras. In: Santos, F. D., Miranda, P., *Alterações Climáticas em Portugal: Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II*. Gradiva Publicações, Lisboa.

Antunes, C. (2011). Monitoring sea level change at Cascais tide gauge. *Journal of Coastal Research*, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), Szczecin, Poland, ISSN 0749-0258, pp 870-874.

Carvalho, F. (1999). Simulação Numérica da Sobrelevação do Nível do Mar de Origem Meteorológica. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências. Universidade de Lisboa.

Dasgupta, S., Laplante, B., Murray, S. e Wheeler, D. (2011). Exposure of developing countries to sea-level rise and storm surges. *Climate Change*, 106, 567-579.

Davison A. C. e Hinkley, D. V. (1997). *Bootstrap Methods and their Application*. Cambridge University Press. UK.

Gaslikova, L., Schwerzmann, A., Raible, C. C. e Stocker T. F. (2011). Future storm surge impacts on insurable losses for the North Sea region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 1205-1216.

Hallegatte, S., Ranger, N., Mestre, O., Dumas, P., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C. e Wood R. M. (2011). Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climate Change*, 104: 113-137.

Morais, C. C. e Abecassis. (1978). Storm surge effects at Leixões. Memória n.º53. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. 23.

Shepard, C. C., Agostini, V. N., Gilmer, B., Allen, T., Stone, J., Brooks, W. e Beck, M. W. (2012). Assessing future risk: quantifying the effects of sea level rise on storm surge risk for the southern shores of Long Island, New York. *Natural Hazards*, 60: 727-745-.

Taborda, R. e Dias, J. M. A. (1992). Análise da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de Fevereiro/Março de 1987 e Dezembro de 1981. *Geonovas* n.º1, *A Geologia e o Ambiente*, 89-97.

Troccoli, A., Zambon, F., Hodges, K. I. e Marani, M. (2011). Storm surge frequency reduction in Venice under climate change. *Climate Change*.