INSTITUTO DOM LUIZ FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA







Determinação da Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade da Área Ribeirinha de Lisboa afetada pela Sobrelevação da Maré como consequência da futura subida do Nível Médio do Mar

EMAAC - Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas da Câmara Municipal de Lisboa

Carlos ANTUNES Cristina CATITA Carolina ROCHA

INSTITUTO DOM LUIZ FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE LISBOA

Relatório Técnico

Estudo de Avaliação da Sobrelevação da Maré

Determinação da Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade da Área Ribeirinha de Lisboa afetada pela Sobrelevação da Maré como consequência da futura subida do Nível Médio do Mar

Trabalho realizado no âmbito da

EMAAC - Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas
da Câmara Municipal de Lisboa

Autores

Carlos Antunes, Prof. Auxiliar do DEGGE, FCUL, Investigador do IDL Cristina Catita, Prof.ª Auxiliar do DEGGE, FCUL, Investigadora do IDL Engª Carolina Rocha, Bolseira do IDL





Relatório Técnico iii





Âmbito do Trabalho

No âmbito da elaboração da Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas (EMAAC) para a cidade de Lisboa, foram já identificadas as vulnerabilidades atuais face aos diferentes eventos climáticos adversos e, com base nas projeções climáticas para cidade no séc. XXI, foram identificadas as vulnerabilidades climáticas futuras e feita a projeção dos riscos associados a diferentes eventos e vulnerabilidades da cidade. Esta avaliação carecia, no entanto, e em particular, de maior aprofundamento quanto ao fenómeno de sobrelevação extrema da maré face a cenários futuros de subida do nível médio do mar. Facto que justificou o estudo aqui apresentado.

Este relatório, de natureza técnica, foi realizado por uma equipa do Instituto Dom Luiz e da Faculdade de Ciências da U.L. (IDL/FCUL), cujo trabalho cientifico se tem desenvolvido na área da engenharia geoespacial, em particular na análise da variação do nível do mar, na modelação da sobrelevação meteorológica das marés e na análise espácio-temporal de fenómenos de natureza geográfica. A experiência adquirida por esta equipa na elaboração de estudos relacionados com o a aplicação da Diretiva Comunitária 2007/60/CE sobre a avaliação de riscos de inundação em toda a extensão da costa continental portuguesa, confere-lhe competências que permitem dar resposta aos objetivos propostos para este estudo conducente à determinação da Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade da área ribeirinha da cidade de Lisboa resultante da espacialização de cenários futuros de subida do nível médio do mar, como consequência do forçamento das alterações climáticas.

O Trabalho foi desenvolvido no âmbito da EMAAC do Município de Lisboa e solicitado pela Direção Municipal do Urbanismo da CML.





Índice

ÂMBITO DO TRABALHO	IV
ÍNDICE	ν
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABELAS	VIII
ACRÓNIMOS	IX
SUMÁRIO EXECUTIVO	1
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	6
CAPÍTULO 2 – CENÁRIOS DE INUNDAÇÃO	10
2.1. Variação do Nível do Mar	10
2.1.1. Modelação da maré astronómica	10
2.1.2. Extremos de sobrelevação da maré	13
2.1.3. Subida do nível médio do mar	14
2.2. Modelos de projeção da subida do nível médio do mar	
2.3. Definição dos cenários futuros de inundação ribeirinha	19
2.3.1. Máximos e níveis extremos	19
2.3.2. Cenários de inundação para 2050 e 2100	20
CAPÍTULO 3 – CARTOGRAFIA DE INUNDAÇÃO E VULNERABILIDADE	22
3.1. Modelo digital de terreno	
3.1.1. Validação	22
3.2. Cartas de inundação	
3.2.1. Índice de perigosidade de inundação	
3.2.2. Resultados da avaliação de inundação e submersão	27
3.2.2.1. Cenário para 2050	28
3.2.2.2. Cenário para 2100	32
3.3. Cartas de vulnerabilidade física	37
3.3.1. Índice de vulnerabilidade	37
3.3.2. Resultados da avaliação de vulnerabilidade	38
CAPÍTULO 4 – DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
ANEXOS	46
ANEXO 1 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VALIDAÇÃO EXTERNA DO DTM	46
ANEXO 2 – MAPA DAS EREGUESIAS RIBEIRINHAS DO CONCELHO DE LISBOA	46





Índice de Figuras

FIGURA 1. PROJEÇÕES DA MÁXIMA PREIA-MAR EM LISBOA (EM METROS), COM BASE NAS PROJEÇÕES DE SUBIDA DO NMM, QUATR	
MODELOS DA FCUL, O MODELO RCP8.5 DO IPCC E DOIS CENÁRIOS EXTREMOS DA NOAA.	
Figura 2. Gráfico da altura da maré astronómica de Lisboa para 2015, relativas ao NMM Cascais 1938	11
Figura 3. Variação das Máximas Preias-mar de Águas Vivas Equinociais (MPAVE) para Lisboa, de 1970 a 2037,	
relativas ao ZH respetivo (2.08 m) e incorporando a subida observada e prevista do NMM do marégrafo de	
Cascais (Mod.FC_2) [Antunes, 2007].	12
Figura 4. Projeção da tendência da máxima PM (MPAVE) de Lisboa até 2200, baseada no cenário intermédio do	
Mod.FC_2 e na maré de referência de 2015 (azul), acrescida dos valores extremos para períodos de retorno i	DE
20 (VERDE) E 100 ANOS (VERMELHO)	12
FIGURA 5. GRÁFICO DA ELEVAÇÃO DA MARÉ ASTRONÓMICA DE LISBOA PARA 2100, RELATIVA AO NMM DE CASCAIS 1938	13
FIGURA 6. CURVAS DE PERÍODOS DE RETORNO DOS MÁXIMOS DE MARÉ E DE SOBRELEVAÇÃO METEOROLÓGICA (SM) DO MARÉGRAF	0
DE LISBOA (COM BASE NOS REGISTOS DE MARÉ DE 1972-2016).	14
FIGURA 7. VARIAÇÃO SECULAR DO NÍVEL MÉDIO DO MAR EM CASCAIS (SÉRIE DE MÉDIAS MENSAIS), DE 1882 A 2016	
FIGURA 8. SÉRIE DE MÉDIAS DIÁRIAS DO NMM DO MARÉGRAFO DE CASCAIS, DE 2005 A 2016.	
FIGURA 9. MODELO DE PROJEÇÃO DO NMM (EM CM), MOD-FC_2 DE PERIGOSIDADE INTERMÉDIA, COM RESPETIVAS CURVAS DE	
PROBABILIDADE MÁXIMA E MÍNIMA, E RESPETIVA CURVA DE PROBABILIDADE CONDICIONAL, SOBREPOSTO COM A CURVA DE	
OBSERVAÇÃO DO NMM DO MARÉGRAFO DE CASCAIS (AZUL).	17
FIGURA 10. MODELOS DE PROJEÇÃO DE SUBIDA DO NMM (EM METROS) DA FCUL, INFERIDOS A PARTIR DOS DADOS DA SÉRIE DO	
MARÉGRAFO DE CASCAIS, SOBREPOSTOS COM A CURVA DE TENDÊNCIA DO NMM OBSERVADO (AZUL ESCURO) E COM O MODI	ELO
de projeção RCP8.5 do IPCC (verde).	
FIGURA 11. PROJEÇÃO DAS COMPONENTES DE SUBIDA DO NMM EM CASCAIS (EM METROS), BASEADO NAS ESTIMATIVAS DO	
RELATÓRIO ARS DO IPPC E APLICADOS AO CENÁRIO INTERMÉDIO DO MOD.FC_2 (DE 1.13 M ATÉ 2100)	19
FIGURA 12. PROJEÇÕES DA MÁXIMA PREIA-MAR EM LISBOA (EM METROS), COM BASE NAS PROJEÇÕES DE SUBIDA DO NMM, QUAT	
MODELOS DA FCUL, O CENÁRIO RCP8.5 DO IPCC E DOIS CENÁRIOS EXTREMOS DA NOAA. COM INDICAÇÃO DOS NÍVEIS DE	
perigosidade, de Baixo a Extremo, para cada modelo de projeção	19
FIGURA 13. CURVAS DE PERCENTIL DE SUBMERSÃO DE ALTITUDES DE TERRENO, PARA 2050 (ESQUERDA) E 2100 (DIREITA), E PARA	
DIFERENTES CENÁRIOS COM PERÍODOS DE RETORNOS DE 50 E 100 ANOS DE SM E SETUP DE VENTO.	
FIGURA 14. MODELO DIGITAL DE TERRENO DO CONCELHO DE LISBOA, COM RESOLUÇÃO DE 1 M	
FIGURA 15. LOCALIZAÇÃO DAS MARCAS DE NIVELAMENTO E RESPETIVA ESTATÍSTICA DA VALIDAÇÃO DO MDT	
Figura 16. Realização do trabalho de campo com medições de GPS para validação do MDT, dos cenários de	
INUNDAÇÃO E DOS NÍVEIS DE MARÉ	24
Figura 17. Distribuição dos pontos de medição GPS para validação do MDT, dos cenários de inundação e dos níveis	
MARÉ	
Figura 18. Distribuição dos pontos de medição GPS para validação dos cenários de inundação, bem como a sua	
CLASSIFICAÇÃO CONSOANTE A MEDIÇÃO DIRETA GPS.	25
FIGURA 19. MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE INUNDAÇÃO DE UM DADO LOCAL (1.5 M, 2.5 M E 3.5 M DE COTA)	
RESPETIVO ÍNDICE DE PERIGOSIDADE, RELATIVAMENTE AO MÁXIMO DE MARÉ SOBRELEVADA (EXEMPLO DE NÍVEL DE INUNDAÇÃ	
DE H= 2.5 M) E BASEADO NA INCERTEZA DOS RESPETIVOS PARÂMETROS.	
FIGURA 20. COTAS DE PERCENTIL DE SUBMERSÃO PARA 2050 PARA O CENÁRIO INTERMÉDIO MOD.FC 2	
FIGURA 21. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA PARA O CENÁRIO DE SUBIDA DO NMM MOD.FC_2 PARA O ANO DE 2050 DE NÍVEL	23
EXTREMO DE MARÉ MAIS SOBRELEVAÇÃO METEOROLÓGICA COM PERÍODO DE RETORNO DE 50 ANOS.	30
FIGURA 22. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA PARA O CENÁRIO DE SUBIDA DO NMM NOAA (<i>Extreme</i>) PARA O ANO DE 2050 DE	50
NÍVEL EXTREMO DE MARÉ MAIS SOBRELEVAÇÃO METEOROLÓGICA COM PERÍODO DE RETORNO DE 50 ANOS	21
FIGURA 23. COTAS DE PERCENTIL DE SUBMERSÃO PARA 2100 PARA O CENÁRIO INTERMÉDIO MOD.FC_2.	
	2/





Figura 25. Probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM Mod.FC_2 para o ano de 2100 de nívi	EL
EXTREMO DE MARÉ MAIS SOBRELEVAÇÃO METEOROLÓGICA COM PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS	35
Figura 26. Probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM NOAA para o ano de 2100 de nível ex	TREMC
de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 100 anos.	36
Figura 27. Fluxo do processo da metodologia para a obtenção da cartografia de vulnerabilidade da zona ribeir	INHA
DA CIDADE DE LISBOA.	38
Figura 28. Índice de Vulnerabilidade física para o concelho de Lisboa no ano de 2050	39
Figura 29. Índice de Vulnerabilidade física para o concelho de Lisboa no ano de 2100	40
Figura 30. Projeção da máxima Preia-mar de Águas-vivas equinociais (MPAVE) de Lisboa até 2200 para os dois	
cenários, intermédio (Mod.FC_2) e extremo (NOAA).	41
Figura 31. Número de anos necessário para a MPAVE atingir uma dada elevação em cada modelo de projeção di	E
SUBIDA DO NMM	42
FIGURA 32. FASES DE ADAPTAÇÃO À SUBIDA DO NMM, EM FUNÇÃO DO VALOR E DA TAXA DE CADA CENÁRIO POSSÍVEL E ADMISS	SÍVEL.
	42
FIGURA 33. NÚMERO DE MARCAS DE VALIDAÇÃO EXTERNA PARA O DTM E DESVIO PADRÃO DA RESPETIVA VALIDAÇÃO	46
FIGURA 34. MAPA DAS FREGUESIAS RIBEIRINHAS DO CONCELHO DE LISBOA	46

Relatório Técnico vii





Índice de Tabelas

2020, 2050 E 2100	3
Tabela 2. Projeções da Máxima Preia-mar (em metros) para os vários cenários de perigosidade, para os períodos de	•
2020, 2050 e 2100, com efeitos de eventos meteorológicos extremos de 100 anos de período de retorno, de	
SOBRELEVAÇÃO METEOROLÓGICA E <i>SETUP</i> DO VENTO, RESPETIVAMENTE	4
TABELA 3. TAXAS DE SUBIDA DO NMM GLOBAL MEDIDO POR ALTIMETRIA DE SATÉLITE E DO MARÉGRAFO DE CASCAS, PARA DOIS	
PERÍODOS RECENTES, DE 24 E 10 ANOS, RESPETIVAMENTE. CNES - CENTRO FRANCÊS; CSIRO - CENTRO AUSTRALIANO; NASA -	
AGÊNCIA AMERICANA (EM MM/ANO)	
TABELA 4. VALORES DE PROJEÇÃO DOS MÁXIMOS DE MARÉ ASTRONÓMICA (EM METROS), DOS VÁRIOS CENÁRIOS DE PERIGOSIDADE	
(Figura 12), para 2050 e 2100, relativos ao Datum Vertical Cascais1938, sem sobreposição do efeito de eventos	s
METEOROLÓGICOS EXTREMOS	
TABELA 5. VALORES DOS CENÁRIOS DE SOBRELEVAÇÃO DA MARÉ DEVIDO AOS EFEITOS EXTREMOS DE SOBRELEVAÇÃO METEOROLÓGICA	
E <i>SETUP</i> DO VENTO, PARA DOIS MODELOS DE PROJEÇÃO DO NMM , EM METROS E RELATIVOS AO <i>DATUM</i> VERTICAL NACIONAL	
(CASCAIS1938)	1
TABELA 6. DESVIO PADRÃO (EM CM) DE CADA CENÁRIO DE INUNDAÇÃO, PARA AS PROJEÇÕES DO MOD.FC_2 (INTERMÉDIO) E DA	
NOAA (Extremo), a partir das componentes que compõem o nível de inundação: a) maré; b) subida do nível	
MÉDIO DO MAR; C) SOBRE-ELEVAÇÃO METEOROLÓGICA; E, D) MODELO DIGITAL DE TERRENO	5
TABELA 7. CLASSIFICAÇÃO DO PARÂMETRO "FORÇAMENTO COSTEIRO" NO ÍNDICE DE PERIGOSIDADE DE INUNDAÇÃO, COM BASE NA	
PROBABILIDADE DE CADA CENÁRIO DE INUNDAÇÃO	7
TABELA 8. ÎNTERVALOS DE COTAS DE INUNDAÇÃO DE CADA NÍVEL DE ÎPI E RESPETIVA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA PARA O CENÁRIO)
DE SUBIDA DO NMM DO MOD-FC_2 E DA NOAA (EXTREME), PARA 2050 COM 50 ANOS DE PR DE SM E SEM SETUP, E PARA	
2100 COM 100 ANOS DE PR DE SM E COM SETUP (TABELA 5)	7
Tabela 9. Áreas das freguesias com probabilidade de inundação para o ano de 2050	3
TABELA 10. ÁREAS DAS FREGUESIAS COM PROBABILIDADE DE INUNDAÇÃO PARA O ANO DE 2100	2
Tabela 11. Classificação dos parâmetros para o índice de vulnerabilidade, bem como os respetivos pesos atribuídos. 38	3
TABELA 12. VALORES MÁXIMOS DE ELEVAÇÃO DA MARÉ EXTREMA DE CADA MODELO PARA CADA FASE DE ADAPTAÇÃO, RETIRADOS DA	
FIGURA 30 E DEFINIDOS PARA OS CENÁRIOS DE PERIGOSIDADE DA INTERMÉDIA-BAIXA (MOD.FC_1, EQUIVALENTE AO RCP8.5	
do IPCC) à extrema (NOAA)	3

Relatório Técnico viii





Acrónimos

AHP Analytic Hierarchy Process

APL Administração do Porto de Lisboa
AR5 Fifth Assessment Report of IPCC

BAU Business as usual

CML Câmara Municipal de LisboaCNES Centre National d'Études Spatiales

CSIRO Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

DGT Direção Geral do Território
DLC Distância à Linha de Costa
DRD Distância à Rede de Drenagem
DRH Distância à Rede Hidrográfica
MDT Modelo Digital de Terreno

EMAAC Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas

ES Espaços Subterrâneos

ETRS89 European Terrestrial Reference System 1989

PT-TM06 Sistema de Coordenadas Transversa Mercator de Portugal

EUA Estados Unidos da América

FCUL Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

GEE Gases de Efeito de Estufa

GeodPT08 Modelo de Geoide para Portugal Continental de 2008

GNSS Global Navigation Satellite System

GPS Global Positioning System
IH Instituto Hidrográfico
IDL Instituto Dom Luiz

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

IPIÍndice de Perigosidade da InundaçãoIVFÍndice de Vulnerabilidade FísicaLIDARLight Detection and RangingMDTModelo Digital de Terreno

Modelos de Projeção do NMM da FCUL

MPAVE Máxima Preia-Mar de Águas-Vivas Equinociais
NASA National Aeronautics and Space Administration

NMM Nível Médio do Mar

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

PR Período de Retorno

RCP Representative Concentration Pathways

RENEP Rede Nacional de Estações Permanentes GNSS

RTK Real Time Kinematic

SIG Sistemas de Informação Geográfica

SM Sobrelevação meteorológica
TIN Triangular Irregular Network

ZH Zero Hidrográfico





Sumário Executivo

Este estudo aplica uma metodologia que permite avaliar o impacto e a extensão territorial costeira afetada por cenários de subida do Nível Médio do Mar (NMM), com sobreposição dos efeitos de variação de maré, de sobrelevação meteorológica e *setup*de vento. Os resultados desta metodologia conduziram à elaboração de uma Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade da área ribeirinha da cidade de Lisboa resultante da espacialização dos cenários de subida do NMM.

A experiência já adquirida pelos autores sobre o estudo de avaliação de risco de inundação costeira em toda a extensão da costa continental portuguesa, permitiu desenvolver uma metodologia baseada em tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (SIG)para avaliar o impacto e extensão territorial costeira de cenários de inundação extrema. Esta metodologia foi aplicada em toda a extensão da costa portuguesa, usando para o efeito dados com uma resolução espacial de 20 m. Para este estudo de pormenor da cidade de Lisboa, os dados altimétricos usados apresentam a resolução espacial máxima disponível (1 m) e a metodologia foi adaptada e melhorada para uma melhor conformidade com a resolução espacial usada e com o rigor planimétrico e altimétrico exigidos.

De modo a incluir o conhecimento mais atualizado da evolução do NMM e a projeção futura da sobrelevação da maré, foram considerados os dados mais atuais dos marégrafos de Cascais e Lisboa. Os cenários apresentados neste estudo contemplam também os cenários da variação do NMM apresentados nos estudos mais recentes sobre a temática. Em particular, os que constam no recente relatório da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), de janeiro de 2017, sobre cenários futuros de subida do NMM global e regional para os Estados Unidos da América (EUA), o qual foi elaborado com o mesmo objetivo que o presente estudo para a EMAAC de Lisboa. Nesse estudo, a NOAA acrescentou o cenário "*Extreme*" de 2.5 m de subida do NMM global à lista de cenários do seu anterior relatório de 2012 [Parris et al., 2012], que até então estava limitado ao cenário máximo, "*Hightest*" de 2.0 m, e reviu em alta o seu cenário mais baixo, "*Lowest*" de 0.1 m para 0.3 m.

As projeções e resultados mais recentes publicados posteriormente ao 5º relatório (AR5) do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) de 2013 [Church *et al.*, 2013], apresentam evidências que suportam uma possível subida do NMM global superior a 2.0 metros [Hansen *et al.*, 2016; Jevrejeva *et al.*, 2014; Sweet *et al.*, 2017]. Os resultados da monitorização da cobertura de gelo dos oceanos Ártico e Antártico mostram claras evidências da possibilidade de ocorrer uma rápida aceleração de degelo dos sistemas glaciares adjacentes, contribuído para uma subida do NMM mais rápida do que tem até aqui sido assumido. Em particular, estudos recentes sobre a instabilidade dos glaciares da Antárctica, nomeadamente do setor oeste, apresentam uma maior probabilidade de tais magnitudes de subida do NMM ocorrerem antes de 2100 [Sweet *et al.*, 2017].

Em conformidade com o que a comunidade científica internacional tem comprovado e considerado como cenários mais prováveis, os autores deste estudo decidiram considerar os cenários mais gravosos compatíveis com os que são apresentados no recente relatório da NOAA, com valores de NMM substancialmente mais elevados do que o cenário que tinha





vindo a ser considerado até 2100, o de 1.14 [Antunes, 2016], relativo ao *Datum* Altimétrico Nacional de Cascais 1938 (referência do sistema de altitudes ortométricas, Helmert 1938).

Para uma melhor compreensão dos cenários considerados, os autores deste trabalho diferenciamos cenários de projeção base, de origem semi-empírica, dos cenários de projeção probabilística de subida futura do NMM necessários à avaliação de risco costeiro com vista à adequada gestão e reordenamento do território no âmbito das EMAAC. As projeções probabilísticas, como as que são apresentadas nos relatórios do IPCC, resultam da projeção das incertezas dos modelos e da sua condição de dependência das emissões futuras de gases de efeito estufa (GEE), ou de hipotéticos cenários de emissões associados a modelos de aquecimento global da atmosfera e dos oceanos [Church et al., 2013]. As projeções base, definidas de forma semi-empírica, são consideradas meras projeções numéricas resultantes de ajustamentos matemáticos da curva de variação do NMM observado a funções polinomiais (não-lineares), definidos basicamente com dois parâmetros, uma taxa inicial e uma aceleração. As curvas de projeção, para o caso particular de um lugar específico, como é a cidade de Lisboa, são posteriormente ajustadas localmente, tendo em consideração o referencial altimétrico associado à informação de base cartográfica e aos movimentos verticais relativos da região, bem como, outros fenómenos locais que sejam relevantes. Contudo, partindo de projeções semi-empíricas ajustadas aos dados maregráficos e considerando as incertezas dos parâmetros associados, podem-se projetar intervalos de incerteza e de confiança probabilística, constituindo assim domínios de projeção probabilísticos.

Em termos de horizonte temporal, tem sido prática comum estabelecer para os cenários climáticos e sua abordagem um período até 2100. Porém, dada a inércia dos oceanos, com respostas lentas e de maior longevidade temporal, da centena a milhares de anos, bem como, o facto da cidade de Lisboa ser uma cidade de importância estratégica por se localizar na margem do rio Tejo, logo excessivamente exposta a situações de risco extremo (temporais, cheias e tsunamis), é de extrema importância apresentar e avaliar os cenários de projeção da subida do NMM para horizontes mais alargados. Deste modo, este relatório inclui também as projeções de subida do NMM até 2200, em particular o nível extremo de maré, dado que o NMM continuará a subir após 2100com a mesma aceleração.

A amplitude dos cenários apresentados neste relatório, de 0.45 m até 2.60 m (cotas relativas ao sistema altimétrico português), está discretizada em intervalos de 10 anos até 2100 para os diferentes cenários, alinhados com as projeções de aquecimento global, e divididos em seis níveis de gravidade ou perigosidade para 2100 (Tabela 1): **Baixo** (0.45 m), **Intermédio-Baixo** (0.90 m), **Intermédio** (1.13 m), **Intermédio-Alto** (1.54 m), **Elevado** (2.11 m) e **Extremo** (2.61 m), como apresentado na Figura 1. Em particular, o nível **Intermédio-Baixo** coincide com o cenário mais gravoso do relatório do IPCC de 2013, o RCP8.5, e os níveis Elevado e Extremo são suportados nos respetivos cenários máximos do relatório da NOAA de 2017. Os restantes níveis são projeções da FCUL baseadas em modelos de ajustamento aos dados da série maregráfica de Cascais. Apesar dos níveis intermédios serem, atualmente, os cenários com maior probabilidade de ocorrência, os mais extremos têm igual probabilidade de ocorrerem [Jevrejeva et al., 2014]. Há uma grande incerteza quanto à sua probabilidade, pois não se consegue prever com grande exatidão quando poderá ocorrer nem qual a sua magnitude, mas existem fortes convicções de que irá ocorrer. Permanecendo apenas a incerteza de "quando irá ocorrer" e não "se irá ocorrer".





Tabela 1.Projeções do NMM (em metros), dos vários cenários de perigosidadeda FCUL, do IPCC e da NOAA, para 2020, 2050 e 2100.

Ano	Mod.FC_0	IPCC (RCP8.5)	Mod.FC_1	Mod.FC_2	Mod.FC_3	NOAA (Hight)	NOAA (Extreme)
2020	0.20	0.20	0.20	0.20	0.22	0.24	0.26
2050	0.30	0.38	0.39	0.43	0.54	0.68	0.80
2100	0.45	0.85	0.90	1.13	1.54	2.11	2.61

Os cenários de subida relativa do NMM aqui apresentados complementam e preenchem a lacuna que existe entre a informação climática global, que suporta a subida absoluta e global do NMM, e a informação necessária a um vasto leque de processos e abordagens ao nível da avaliação, planeamento e decisão sobre a gestão e o ordenamento do território, baseados sempre em informação geográfica suportada em cartografia de base e definida em sistemas de referência locais ou regionais. Assim, os valores de cota ou altitude que aqui se apresentam referem-se já ao sistema de altitudes da cartografia terrestre portuguesa e ao valor relativo da variação do NMM, tendo em conta as velocidades verticais locais da crusta terrestre.

Os cenários de subida do NMM são também apresentados em termos de mapas de inundação para um nível extremo de máximo de maré (Máxima Preia-Mar de Águas-Vivas Equinociais – MPAVE), correspondente a 0.1% do percentil de submersão, e com cinco níveis de perigosidade, correspondentes a níveis de probabilidade: **1 - Muito Baixo** (0 - 20%); **2 - Baixo** (20 - 40%); **3 - Moderado** (40-60%); **4 - Elevado** (60-80%); e **5 - Extremo** (80-100%). Estes cenários de inundação são apresentados para um horizonte temporal de 2050 e 2100, com dois níveis de eventos meteorológicos extremos, de acordo com a Diretiva 2007/60/CE, de períodos de retorno de 50 e 100 anos, respetivamente. De igual modo, são elaboradas cartas de inundação permanente, devido única e exclusivamente ao forçamento da maré astronómica (sem qualquer sobrelevação meteorológica), para cinco níveis de cotas máximos de submersão: 0.1% (duração de 9 horas anuais); 1% (duração de 88 horas anuais); 2.5% (duração de 219 horas anuais); 5% (duração de 438 horas anuais); e 10% (duração de 876 horas anuais).

A Figura 1 mostra, sem qualquer efeito extremo meteorológico sobreposto, a evolução da tendência de MPAVE para cada cenário de subida do NMM, em cotas de elevação do terreno, permitindo assim avaliar os níveis naturais que o máximo da maré astronómica pode atingir até 2100. Adicionando os valores de extremos meteorológicos aos valores da MPAVE, para períodos de retorno de 100 anos, obtêm-se as cotas máximas de inundação ribeirinha para cada um dos cenários.





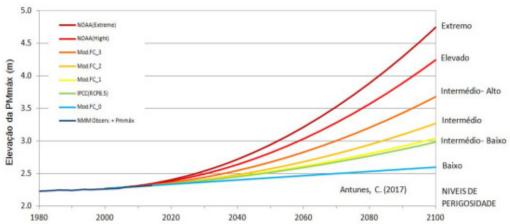


Figura 1. Projeções da Máxima Preia-mar em Lisboa (em metros), com base nas projeções de subida do NMM, quatro modelos da FCUL, o modelo RCP8.5 do IPCC e dois cenários extremos da NOAA.

A Tabela 2apresenta esses mesmos valores para os períodos de futuro imediato(2020), intermédio (2050) e longínquo (2100). Considerando as projeções de subida do NMM mais prováveis, verifica-se que o Mod.FC_1 (semelhante ao cenário RCP8.5 do IPCC) e o Mod.FC_2 (usado neste estudo como cenário principal), indicam que a cota topográfica a adotar para as medidas de adaptação da cidade de Lisboa no seu plano diretor até 2100, deverá ser entre os *3.80 m*e os *4.00 m*. Caso se assuma e se pretenda suportar a respetiva decisão nos cenários de perigosidade intermédia-alta (Mod.FC_3) e alta (*Hight* da NOAA), então essa cota topográfica limite para as medidas de adaptação ribeirinha deverá situar-se entre os 4.40 m e os 5.00 m.

Tabela 2.Projeções da Máxima Preia-mar (em metros) para os vários cenários de perigosidade, para os períodos de 2020, 2050 e 2100, com efeitos de eventos meteorológicos extremos de 100 anos de período de retorno, de sobrelevação meteorológica e *setup* do vento, respetivamente.

Ano	Mod.FC_0	IPCC (RCP8.5)	Mod.FC_1	Mod.FC_2	Mod.FC_3	NOAA (Hight)	NOAA (Extreme)
2020	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.2
2050	3.2	3.3	3.3	3.3	3.4	3.6	3.7
2100	3.4	3.7	3.8	4.0	4.4	5.0	5.5

Neste estudo são também apresentadas cartas de vulnerabilidade física que resultam da combinação do cenário intermédio (mais provável, Mod.FC_2) com o cenário extremo (*Extreme* da NOAA), e de cinco fatores físicos (distâncias à margem do rio, distância à rede hidrográfica e à rede de drenagem, e ainda a existência de espaços subterrâneos). Nestas cartas não foram considerados fatores socioeconómicos e apenas se consideraram alguns cenários e períodos, os quais foram suficientes para identificar as zonas ribeirinhas de maior vulnerabilidade, logo mais suscetíveis de serem sujeitas à aplicação de planos específicos de adaptação à subida do NMM e da sobrelevação da maré.

Como resultados deste estudo recomenda-se veemente a utilização dos cenários extremos como possibilidade de ocorrência mais gravosa, por implicarem impactos e danos consideravelmente mais elevados que podem colocar em risco o normal funcionamento da cidade. Sendo Lisboa uma cidade próxima da costa, esta deverá preparar-se de forma progressiva e ao ritmo da evolução da taxa de subida do NMM tornando-se mais resiliente para que no futuro os efeitos dos cenários mais gravosos sejam minimizados.





Neste relatório sugerem-se ainda valores de referência para as sucessivas fases de adaptação, em função do conhecimento atual da variação do nível do mar e dos efeitos meteorológicos extremos. Contudo, futuras revisões da avaliação dos cenários de subida do NMM poderão implicar a revisão desses valores de referência. Pelo que, é aconselhável que a EMAAC de Lisboa considere as várias fases de adaptação de forma planeada e compatível com o conhecimento mais atual da tendência de subida do NMM e da sobrelevação da maré.





Capítulo 1 – Introdução

Considerando que vivem atualmente em Portugal milhares de pessoas em zonas costeiras com risco potencial de serem afetadas pela subida do NMM, bem como, a existência de infraestruturas de elevada importância económica, sejam elas de transportes, de administração pública e serviços, de turismo, ou de outra qualquer atividade, o risco da subida do NMM aumentará drasticamente no futuro, à medida da taxa de subida e ao aumento dessa exposição ao risco. A avaliação da vulnerabilidade ao risco de subida do NMM das zonas urbanas ocupadas é de crucial importância para a adoção de medidas e estratégias de adaptação às alterações climáticas.

O cumprimento das normas impostas pela Diretiva Comunitária 2007/60/CE, transposta para a lei nacional através do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de outubro, relativo à avaliação e gestão de riscos de inundação, obriga os estados membros a avaliarem a vulnerabilidade e risco costeiro associado à inundação provocada pela subida do NMM conjugada com a ocorrência de eventos extremos que potenciam o galgamento e a inundação em zonas costeiras expostas a este tipo de riscos. No âmbito desta Diretiva, as instituições nacionais devem elaborar a cartografia de risco, identificando, numa primeira fase as zonas de maior vulnerabilidade, e numa segunda fase, executar com o máximo rigor e pormenor a respetiva cartografia de risco. As zonas costeiras de toda a extensão do território continental nacional, que apresentam maior vulnerabilidade à inundação face aos cenários de subida do NMM projetados para a costa portuguesa e para os horizontes temporais de 2050 e 2100, foram já identificadas pelos autores deste estudo em trabalhos anteriores. O desenvolvimento e implantação das EMAAC dos municípios costeiros, que sejam afetados pelo efeito de subida do NMM, enguadra-se no âmbito e objetivos da segunda fase da Diretiva 2007/60/CE. Assim, o presente estudo solicitado pela CML, no âmbito da sua EMAAC, cumpre o requisito da Diretiva para a avaliação da vulnerabilidade na zona ribeirinha da cidade de Lisboa.

A partir dos registos do marégrafo de Cascais (Figura 7), a operar desde 1882, é possível concluir que o NMM na costa portuguesa já subiu cerca de 22 cm desde a segunda década do séc. XX, sendo que 8 cm dos quais ocorreram nos últimos 25 anos. Tal subida corresponde a uma taxa média de 2.2 mm/ano nos últimos 100 anos e de 3.2 mm/ano nos últimos 25 anos. Taxas essas que são superiores à estimada para o séc. XX, de 1.5 mm/ano, e ligeiramente superior a 1.9 mm/ano para o período entre 1920 e 2000. Esta evolução da taxa de subida só é compreensível com a hipótese de que o NMM está num processo de aceleração, correspondente a um sucessivo aumento das taxas médias de subida nos períodos mais recentes. Este facto é corroborado com os dados mais atuais de observação dos oceanos a partir de dados de satélite, de altimetria (*Jason*1 e 2) e gravimetria (*Grace*), e da rede de flutuadores *Argo* que medem a evolução da temperatura média da camada superficial de 300 m dos oceanos, evidenciando uma mais rápida subida do NMM nos últimos 10 anos [Sweet *et al.*, 2017].

Devido à complexa dinâmica dos oceanos e à sua elevada inércia, de resposta lenta e demorada, os cientistas esperam que o NMM continue a subir após o séc. XXI com a mesma aceleração. Esta aceleração deve-se essencialmente, ao aquecimento global atual, de cerca de 1°C acima da temperatura do período pré-industrial e do aquecimento que continuará a ocorrer no futuro próximo, apesar da incerteza quanto ao nível das futuras





emissões de carbono e da evolução dos níveis de concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. A absorção da energia associada ao aquecimento global por parte dos oceanos é lenta, pelo que, do lado da expansão térmica dos oceanos continuaremos a assistir muito para lá de 2100 a uma contínua e progressiva expansão do volume e consequente subida do NMM. Por outro lado, o atual e futuro aquecimento global continuará a contribuir para o aumento do degelo dos glaciares, principalmente, da Antártida e da Gronelândia, que constituem os maiores reservatórios de gelo continental e que irão contribuir significativamente para a futura subida do NMM. Combinados, estes dois sistemas de glaciares polares contêm gelo suficiente para fazer subir o NMM em mais de 60 m. Dependendo da sua dinâmica, isto é, dependendo da rapidez com estes poderão vir a perder parte do seu gelo, poderemos assistir a uma subida do NMM mais rápida ou mais lenta até ao final do século.

Para se poderem elaborar mapas de inundação e de vulnerabilidade da zona ribeirinha da cidade de Lisboa que traduzam cenários de níveis extremos de sobrelevação da maré, é necessário analisar e definir rigorosamente os vários fatores que contribuem para os níveis extremos dos cenários futuros a considerar. Com esse objetivo, é necessário modelar e projetar um conjunto de vários fatores e parâmetros, como sejam: modelos de subida relativa do NMM para a região e, em particular, para o estuário do rio Tejo junto à cidade de Lisboa; modelos exatos da maré oceânica do porto maregráfico de Lisboa; fatores de forçamento de sobrelevação meteorológica gerados em situação de temporal extremo; bem como, outros fatores que alterem a altimetria do terreno, tais como, velocidades verticais do terreno de dinâmica regional e local (soerguimentos e/ou subsidências).

É prática comum na elaboração de cartografia de risco considerar normalmente dois cenários, um provável e intermédio, e outro extremo, mas menos provável, embora de igual forma possível e suscetível de vir a ocorrer num dado horizonte temporal, tal como definido na Diretiva 2007/60/CE. Neste estudo são apresentados vários cenários, com diferentes origens e baseados em diferentes prossupostos, no entanto, os resultados apresentados em termos de cartografia de inundação e vulnerabilidade são suportados apenas em dois cenários, o intermédio e o extremo.

Procurando que os temas expostos neste relatório sejam facilmente compreendidos por técnicos não especialistas, os modelos dos vários cenários de subida do NMM, bem como, a sua origem e a relação entre eles são seguidamente descritos de forma simplificada.

A subida do NMM está associada ao aumento da frequência de erosão e inundações costeiras. Um NMM mais elevado aumenta o impacto e os danos resultantes das sobrelevações meteorológicas, das marés vivas e da agitação marítima, mesmo sem o aumento da frequência e intensidade das tempestades. Existem regiões do mundo onde esta evidência de causa-efeito já se faz sentir, tornando o problema numa preocupação atual e com condições de se tornar progressivamente mais problemático em países e regiões onde a excessiva ocupação urbana ou o elevado valor económico associado à indústria do turismo aumentam a exposição e vulnerabilidade a este risco. Mesmo a pequena subida do NMM já registada nas últimas décadas tem causado o aumento dos impactos em muitas zonas costeiras dos EUA [Parris et al., 2012] e noutras regiões do mundo. Lisboa não é uma cidade costeira e, por isso, não está sujeita ao risco de erosão, contudo, o facto de fazer parte de um sistema de águas interiores com forte influência da





maré oceânica, torna a cidade vulnerável à subida do NMM e ao fator de inundação ribeirinha. Se associarmos o facto de ser também uma cidade de acentuados declives de terreno, com várias bacias hidrográficas e com histórico de inundações urbanas de origem meteorológica, a cidade torna-se ainda mais vulnerável a este forçamento costeiro.

Um outro fator que deve também ser objeto de preocupação e por isso, considerado no planeamento estratégico da zona ribeirinha da cidade, é a probabilidade de ocorrência de tsunamis associados à atividade sísmica, como o de 1755. O NMM mais elevado irá sobrelevar a maré e potenciar um maior risco em caso de ocorrência de um tsunami. Os danos e impactos de uma onda de tsunami sobreposta a uma maré sobrelevada em mais de 1.5 ou 2.0 metros, relativamente à maré de 1755, seriam tremendamente mais gravosos do que os dessa efeméride, não só devido à maior perigosidade (de maior energia e cota mais elevada), mas também devido à maior exposição na zona de influência.

Os vários cenários de subida do NMM aqui apresentados abrangem uma vasta gama de projeções, desde o nível de perigosidade baixa (0.45 m) ao nível extremo (2.61 m), baseadas em diferentes condições e prossupostos. Eles são apresentados numa perspetiva de apoiar e suportar a tomada de decisão ao nível da gestão da vulnerabilidade e risco nas condições em que tais cenários se baseiam. Todos os cenários de subida do NMM apresentados têm correspondência e equivalem, depois de ajustados aos NMM de Cascais, aos cenários recomendados pela NOAA no seu relatório de janeiro de 2017 [Sweet *et al.*, 2017] às autoridades nacionais e estatais dos EUA para a avaliação das respetivas vulnerabilidades e riscos costeiros.

O nível de perigosidade baixa (Mod.FC_0), equivalente ao nível mais baixo apresentado no 5º relatório do IPCC, corresponde ao cenário da trajetória de emissões de carbono mais baixas (RCP2.5), admitindo o cumprimento de todas as medidas de mitigação necessárias e suficientes para manter a temperatura global abaixo dos 2º C relativamente ao período pósindustrial [Church et al., 2013]. Esse modelo de projeção é obtido simplesmente por aplicação direta da taxa atual de subida do NMM, de 3.2 mm/ano, extraída da série dos últimos 20 anos. Os níveis intermédios de perigosidade (Mod.FC 1, 2 e 3) correspondem aos cenários sem ou de reduzida mitigação, admitindo que o aquecimento médio global ultrapasse os 3.5° C em 2100, e que a dinâmica do degelo glaciar, principalmente da Antártida e da Gronelândia, seja contínua, uniforme e regular, sem qualquer tipo de desestabilização ou colapso. Os níveis mais extremos da NOAA (Hight e Extreme) correspondem aos cenários sem qualquer mitigação relativamente às emissões de carbono (condição de business asusual - BAU) e admitindo uma desintegração dos sistemas glaciares, para além do que é atualmente expectável, de forma que estes contribuam com significativas quantidades adicionais de água doce resultante do respetivo degelo, e que o fator de expansão térmica responda de forma mais rápida do que atualmente é previsto.

No seu relatório AR5 de 2013, o IPCC refere uma nota extremamente importante a considerar, que apenas o colapso dos sectores de base marinha da cobertura de gelo da Antártida, caso se inicie, pode causar a subida substancial do NMM global acima dos valores prováveis durante o séc. XXI [Church et al., 2013]. Acrescenta ainda que o potencial adicional de tal ocorrência não pode ser quantificado comgrande precisão, existindo, contudo, um nível médio de confiança de que esse facto, mesmo que venha a ocorrer, possa não exceder em mais de alguns decímetros a subida do NMM prevista no relatório





AR5. Esta nota evidencia dois aspetos importantes: que admite uma possível subestimação dos seus cenários de subida do NMM global e, que existe a possibilidade de desintegração e colapso do sistema glacial da Antártida.

Estes e outros factos, extraídos do relatório AR5 do IPCC e dos estudos mais recentes, evidenciam a necessidade de se considerarem, numa análise de estudo de vulnerabilidade costeira face à subida do NMM, cenários extremos, que embora atualmente de baixa probabilidade são cenários possíveis de virem a ocorrer em horizontes temporais muito mais próximo do que se possa hoje assumir. É com base nestes prossupostos, muito suportados pelos resultados de Rahmstorf*et al.* (2012), Jevrejeva *et al.* (2014) e de Hansen *et al.* (2016), que a NOAA no seu último relatório fez uma revisão em alta do seu cenário extremo do NMM absoluto, passando dos 2.0 m (cenário Alto) para os 2.5 m (cenário Extremo) [Sweet *et al.*, 2017].





Capítulo 2 – Cenários de Inundação

Com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade ou suscetibilidade a um dado risco são, por norma, considerados vários cenários abrangendo um leque de possibilidades, desde as mais prováveis às menos prováveis, mas hipoteticamente possíveis. Assim, faz sentido apresentar, no âmbito deste estudo, um conjunto de cenários de projeção de subida do NMM e, consequentemente, de sobrelevação da maré para a zona ribeirinha da cidade de Lisboa, baseados nas evidências que suportem a sua possibilidade. Para uma melhor compreensão dos cenários considerados, este capítulo apresenta a análise efetuada à variação do nível do mar, para a qual foram usados os dados observados nos marégrafos portugueses, comparando-os com a observação global do NMM a partir de dados de satélite. Neste capítulo é feita ainda uma análise da subida global do NMM, bem como, os fatores que contribuem para essa subida e são apresentadas as projeções de eventos extremos de sobrelevação meteorológica para períodos de retorno médio (50 anos) e longo (100 anos), de modo a permitir definir os cenários extremos de inundação em períodos de MPAVE.

2.1. Variação do Nível do Mar

A variação do nível do mar, constante e permanente, é um processo não linear e complexo resultante da ação de vários fenómenos de forcamento que atuam de forma diferenciada no espaço e no tempo. Dos vários processos de variação do nível do mar relevantes para este trabalho, destacam-se: a) a variação da maré astronómica; b) a sobrelevação meteorológica; c) a variação do nível médio do mar; d) o setup (empilhamento) do vento de superfície; e) a descarga fluvial; e, f) o movimento vertical local da costa. De todos estes fatores, apenas os quatro primeiros são os mais importantes para este estudo. Os movimentos verticais absolutos, apesar de serem de baixa magnitude, entre -0.1 a 0.3 mm/ano, obtidos pela análise dos dados da estação GPS permanente de Cascais [Serpelloni et al., 2013; Antunes et al., 2010], não alteram a taxa de subida relativa do NMM, por corresponder exatamente à diferença entre a subida do NMM relativo e absoluto. Quanto aos movimentos de subsidência, os estudos realizados para Lisboa a partir de dados de interferometria de Radar [Catalão et al., 2011], a menos de pequenos reajustamentos de assentamento de construções, não indicam gualquer tipo de movimento significativo na zona ribeirinha que justifique a sua consideração, pelo que se pode assumir que a taxa de subida do NMM observada no Marégrafo de Cascais pode ser aplicada na zona de Lisboa. Sobre as descargas fluviais do rio Tejo que possam, em tempos de cheias, sobrelevar o nível de maré junto à cidade de Lisboa, não existe qualquer estudo nem evidência que tal possa ocorrer. Deste modo, apenas o forçamento meteorológico, quer pela sobrelevação quer pelo setup do vento, serão considerados para além da maré e da subida do NMM como fatores que influenciam a variação do nível das águas do mar junto à zona ribeirinha de Lisboa.

2.1.1. Modelação da maré astronómica

A observação da maré foi até ao início deste século, realizado por marégrafos analógicos de poço, em Cascais e Lisboa, como no resto do país. Os dados horários da maré resultante da





observação dos marégrafos permitem a modelação numérica da maré astronómica, resultando assim em modelos numéricos de previsão. A maré astronómica é um fenómeno de oscilação periódica regular, devido ao efeito conjunto de atração gravitacional do Sol e da Lua, e é modelada por funções harmónicas cujos coeficientes ajustados aos dados da maré observada possibilitam o cálculo da altura de maré para qualquer instante passado ou futuro.

Todos os dados de maré, por convenção, são referidos ao referencial vertical usado em Hidrografia, o Zero Hidrográfico (ZH), definido para cada área portuária. Para a zona de Lisboa e Cascais, incluindo todo o estuário do rio Tejo, o ZH é de 2.08 m relativo ao NMM de Cascais, pelo que as alturas de maré devem ser deduzidas deste valor para se obter a designada elevação da maré, a qual corresponde à cota ou altitude ortométrica do terreno relativa ao referencial vertical nacional, o *Datum* Altimétrico de Cascais1938.

Os dados disponibilizados do marégrafo de Lisboa, situado na doca do Terreiro do Trigo, pelo Instituto Hidrográfico (IH), datam de 1973 a 2011, com algumas interrupções. A modelação da maré de Lisboa foi realizada com a série de alturas horárias do ano de 2007, obtendo-se um modelo com uma precisão de 3 cm em altura e 3 minutos em fase.

Dado que os máximos de maré (MPAVE) variam periodicamente, com máximos de 4 a 5 anos (Figura 3), a maré de referência para este estudo corresponde a uma maré de amplitude máxima, coincidente com anos em que a Lua se encontra mais próxima da Terra (anos de "Lua Gigante" ou "Super Lua"), causando "super marés". O ano escolhido foi o de 2015, por ser um ano recente e um ano de marés máximas (Figura 2).

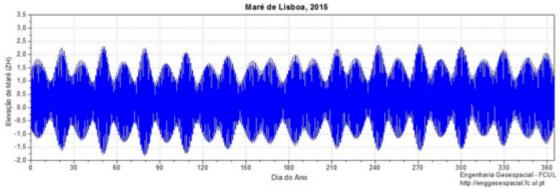


Figura 2.Gráfico da altura da maré astronómica de Lisboa para 2015, relativas ao NMM Cascais 1938.

A modelação harmónica da maré permite calcular extremos de maré para períodos futuros e analisar a variação dos máximos de maré ao longo do tempo. Dado que os modelos de maré da FCUL [Antunes, 2007] incluem a modelação numérica da subida do NMM ajustada à série de dados do marégrafo de Cascais, todos os valores de maré contemplam a variação do NMM. Com base no modelo de previsão de maré podem ser calculados os máximos de maré, correspondentes às MPAVE. A Figura 3 mostra a variação da MPAVE para o porto de Lisboa (relativa ao ZH), desde 1970 a 2037, calculada com base no modelo de previsão de maré da FCUL e no modelo intermédio de subida do NMM (Mod.FC_2). Este gráfico evidencia a evolução da máxima Preia-mar em alturas de maré astronómica, cujo aumento corresponde à subida do NMM estimado para Lisboa.





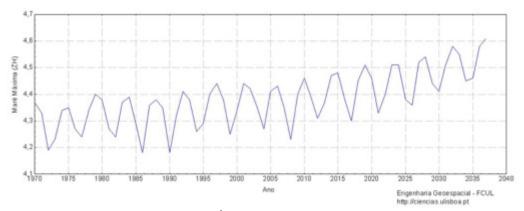


Figura 3. Variação das Máximas Preias-mar de Águas Vivas Equinociais (MPAVE) para Lisboa, de 1970 a 2037, relativas ao ZH respetivo (2.08 m) e incorporando a subida observada e prevista do NMM do marégrafo de Cascais (Mod.FC_2) [Antunes, 2007].

Com base nas projeções de subida do NMM, juntamente com o modelo de maré do ano de referência (2015), é também possível estimar e projetar a evolução da máxima PM para um período futuro de longo prazo. A Figura 4mostra a evolução da elevação do máximo de maré (relativa ao *Datum* vertical Cascais1938, deduzido do Zero Hidrográfico, ZH = 2.08 m), com e sem períodos de retorno de eventos extremos, e para o cenário intermédio de subida do NMM (Mod.FC_2 com 1.13 m em 2100, cf. Tabela 2).

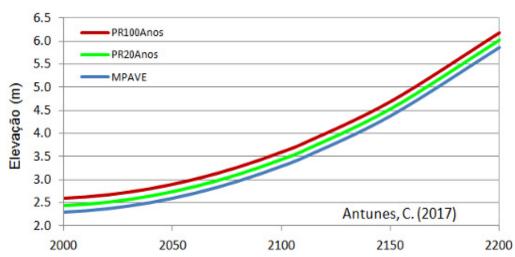


Figura 4. Projeção da tendência da máxima PM (MPAVE) de Lisboa até 2200, baseada no cenário intermédio do Mod.FC_2 ena maré de referência de 2015 (azul), acrescida dos valores extremos para períodos de retorno de 20 (verde) e 100 anos (vermelho).

Com o modelo de previsão ajustado aos dados atualizados de maré podem-se analisar as frequências atuais dos níveis de alturas de maré, de forma a poderem ser calculadas as percentagens de emersão, ou de submersão, de uma dada cota do terreno nas margens do rio. A partir destas frequências determina-se a frequência acumulada de níveis de submersão (percentagem de tempo em que uma dada cota está debaixo de água ao longo do ano) de modo a deduzir percentis de submersão para níveis extremos de máximos de maré (Figura 13). Os percentis de valores extremos de submersão dos terrenos da zona ribeirinha analisados neste estudo são: 0.1% (9 horas anuais); 1% (88 horas anuais); 2.5% (219 horas anuais); 5% 438 horas anuais); e 10% (876 horas anuais).





Baseado na projeção de subida do NMM do Mod.FC_2 pode-se reconstruir a maré anual de 2015 projetada para 2100. A Figura 5mostra o gráfico de maré extrema, de amplitude idêntica à de 2015, projetada para 2100.

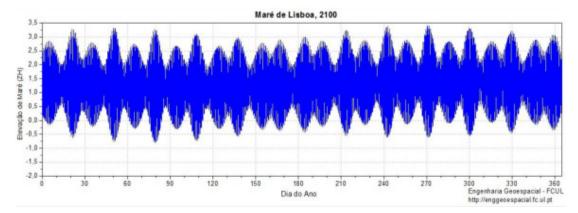


Figura 5.Gráfico da elevação da maré astronómica de Lisboa para 2100, relativa ao NMM de Cascais 1938.

2.1.2. Extremos de sobrelevação da maré

A diferença entre a maré observada e a maré modelada é a componente de forçamento meteorológico, designada por sobrelevação meteorológica (*storm surge*) e resultante do efeito da variação de pressão atmosférica (na proporção de -1 cm/hPa) sobreposto ao efeito persistente de tensão e atrito do vento à superfície do mar, dependendo este da sua direção e intensidade. A sobrelevação meteorológica (SM) é uma perturbação do nível de maré astronómico, que pode variar de alguns centímetros a vários metros e pode durar de horas a alguns dias. Em Portugal, de acordo com os estudos de Andrade *et al.* (2006) e Vieira *et al.* (2012), baseando-se na análise das séries de dados de Cascais e Lisboa, a SM junto à foz do estuário do Tejo pode atingir máximos entre 60 a 70 cm para períodos de retorno longos (superiores 50 anos).

Usando a série de dados disponibilizada pelo IH do marégrafo de Lisboa (1972 a 2016) atualizou-se a análise de máximos de maré e de SM, através da distribuição simples de *Gumble*, de modo a obterem-se as probabilidades de períodos de retorno de níveis extremos (periodicidades prováveis). A Figura 6 mostra os gráficos das duas distribuições de máximos baseado no trabalho de Vieira *et al.* (2012), onde se extraem os valores de 4.65 e 4.72 m para máximas alturas de maré e de 58 e 61 cm para máximas amplitudes de SM, para os períodos de retorno de 50 e 100 anos, respetivamente.

No caso particular de zonas de estuário, há ainda a considerar para efeitos de extremos de maré, o possível fator da dinâmica de descarga fluvial do rio Tejo que pode em situações extremas sobrelevar a maré e potenciar o risco de inundação ribeirinha. Contudo, não foram encontrados estudos que reportem tal efeito na faixa ribeirinha de Lisboa, mas apenas em locais a montante, onde o caudal e a configuração do rio são propícios a esse efeito.





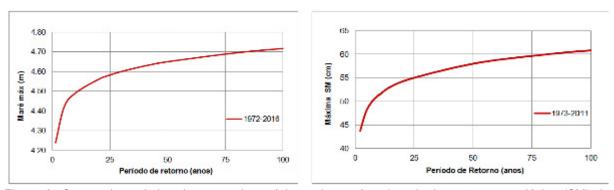


Figura 6. Curvas de períodos de retornodos máximos de maré e de sobrelevação meteorológica (SM) do marégrafo de Lisboa (com base nos registos de maré de 1972-2016).

2.1.3. Subida do nível médio do mar

Recorrendo à longa série de médias mensais do marégrafo de Cascais (Figura 7), a operar desde 1882, é possível constatar que o NMM tem vindo a subir desde 1920, embora com diferentes taxas de subida ao longo deste período. O cálculo da taxa de subida do NMM pode ser extremamente complexos e os dados forem obtidos a partir de um único marégrafo. A qualidade destes dados depende fortemente de vários fatores que os podem tornar mais fiáveis e consistentes com os dados observados por outras fontes, desde que medindo a mesma grandeza. Estes fatores consistem essencialmente num conjunto de procedimentos que devem ser acautelados na observação, no registo de dados e no seu processamento. As condições locais de instalação são também determinantes para a qualidade dos dados, devendo apresentar boas condições de estabilidade vertical (geológica e estrutural) e serem sujeitos à observação contínua de nivelamento geométrico de alta precisão. A validação do estudo e análise de subida do NMM para Cascais é realizada por comparação com os modelos globais, obtidos a partir de dados de satélite ou da rede global de marégrafos, depois de se deduzirem as taxas de movimentos verticais do sítio.

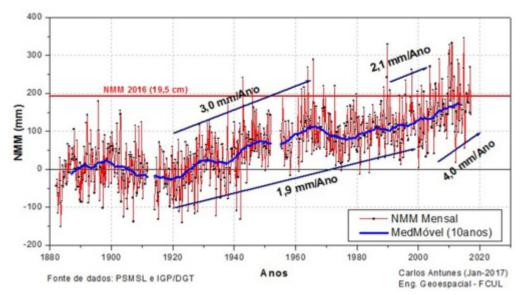


Figura 7. Variação Secular do Nível Médio do Mar em CASCAIS (Série de médias mensais), de 1882 a 2016.





Do ponto de vista científico e para efeitos de comparação com modelos de subida do NMM global, interessa analisar a variação do NMM absoluto, relativo ao centro de massa da Terra. Para trabalhos de avaliação dos impactos locais da subida do NMM, o parâmetro que deve ser considerado é a subida relativa do NMM, medida em relação a um referencial vertical local estável, pois é essa variação que tem relação direta com os respetivos impactos e que deve ser reportada em termos de cartografia topográfica.

A série de médias mensais, por apresentar significativas oscilações e grande variabilidade, é sujeita a uma suavização através da operação de uma média corrida com período de 10 anos. Sendo essa média centrada, a respetiva curva de tendência (azul na Figura 7) termina 5 anos antes da data dos últimos registos. Considerando os dados mais atuais de Cascais até 2016, apenas é possível estimar a taxa de subida do NMM por esta via até 2011. Desta série podemos apenas retirar a taxa de subida do NMM para o período do final do séc. XX e início do séc. XXI, de 2.1 mm/ano [Antunes, 2016].

A avaliação da taxa de subida do NMM mais recente, de 4.0 mm/ano, é realizada por análise da série de médias diárias dos últimos 12 anos (Figura 8). Esta série de valores diários do NMM é sujeita a um conjunto de correções de efeitos conhecidos e modeláveis, como sejam, a variação sazonal do NMM, o efeito barométrico inverso e a velocidade vertical do local estimada com medições plurianuais de nivelamento geométrico de alta precisão, a partir da respetiva marca de referência.

Sobre a curva da média corrida de 60 dias de período é estimada a taxa de subida do NMM por regressão linear. Os valores de taxa de subida do NMM assim estimados apresentam uma grande correlação com os valores da série do NMM do Atlântico Norte medida através do método de altimetria de satélite, da série de satélites *Topex/Pseidon* mais *Jason* 1 e 2. Esta forte correlação deve-se à baixa taxa de velocidade vertical da região, devido aos efeitos combinados de soerguimento (*uplift*) tectónico e ajustamento isostático pós-glacial, não superior a +0.2 mm/ano, obtido por comparação com o modelo global de variação do NMM de Jevrejeva*et al.* (2014).

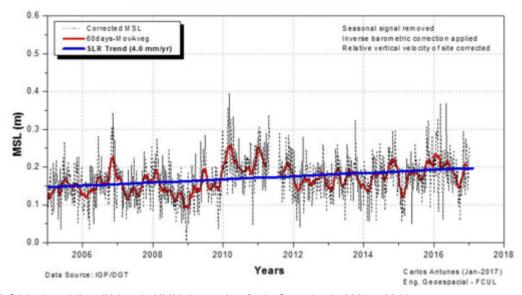


Figura 8. Série de médias diárias do NMM do marégrafo de Cascais, de 2005 a 2016.





Os dados da série de variação do NMM da região norte do oceano Atlântico, obtidos a partir de dados de altimetria de satélite e determinada pelo centro de investigação francês AVISO, do CNES, apresentam uma taxa de subida do NMM muito semelhante à de Cascais, para o período comum definido entre janeiro de 2006 e janeiro de 2016.

A subida do NMM em Cascais mostra uma grande correlação com o NMM global absoluto, obtido por altimetria de satélite, como evidenciam os valores apresentados na Tabela 3. Todas as séries mostram um claro aumento das taxas na última década, evidenciando uma subida do NMM acelerada. Os dados mais recentes, com taxas obtidas a partir de médias mais curtas dos últimos 5 anos, evidenciam isso mesmo, um progressivo e contínuo aumento da taxa de subida do NMM.

Tabela 3.Taxas de subida do NMM global medido por altimetria de satélite e do marégrafo de Cascas, para dois períodos recentes, de 24 e 10 anos, respetivamente. CNES - centro francês; CSIRO - centro Australiano; NASA - agência americana(em mm/ano).

Séries do NMM	Taxa 1992-2016	Taxa 2007-2016
CNES	3.38 ± 0.01	4.20 ± 0.06
CSIRO	3.30 ± 0.03	4.30 ± 0.11
NASA	3.43 ± 0.02	4.28 ± 0.07
Cascais	3.10± 0.09	4.00± 0.14

Uma vez que a série de dados do marégrafo de Lisboa não é suficientemente longa e apresenta algumas falhas no registo de informação, inferem-se para esse local as taxas de subida do NMM a partir dos dados do marégrafo de Cascais, permitindo assim uma estimativa adequada dada a curta distância e a aparente ausência de processos geodinâmicos que possam causar eventuais diferenças de subida do NMM entre estes dois portos maregráficos.

2.2. Modelos de projeção da subida do nível médio do mar

Os modelos de subida do NMM obtidos globalmente através de observação de altimetria de satélite devem ser ajustados localmente de modo a considerar os seguintes fatores: a) variações de longo período da maré terrestre; b) variações do campo gravítico e de rotação da Terra; c) velocidades verticais da superfície terreste devido a efeitos tectónicos, do ajustamento isostático glacial, de carga superficiais, de subsidência e deslocamentos, de compactação e dinâmica sedimentar; d) variações temporais de oscilação do sistema oceano-atmosfera; e, e) outros fatores não-climáticos. Conhecendo estes efeitos é possível converter e correlacionar as séries de registo do NMM com as séries de variação do NMM global.

Atendendo ao conhecimento dos fatores da dinâmica das variações do NMM, e baseados nos estudos de análise de: 1) séries temporais dos marégrafos de Cascais e Lisboa; 2) séries temporais da estação permanente de GPS de Cascais [Serpelloni *et al.*, 2013]; e 3) dados de interferometria de Radar [Catalão *et al.*, 2011], apenas foi considerado o efeito de *uplift* deduzido da análise comparativa da série secular do marégrafo de Cascais com a série de subida do NMMglobal de Jevrejeva *et al.* (2014). Dessa análise resultou um valor médio de +0.2 mm/ano correspondente à diferença do NMM relativo de Cascais com o NMM absoluto global. Dado os estudos de Catalão *et al.* (2013) e de outros autores não revelarem





a existência de qualquer subsidência significativa e persistente na zona ribeirinha da cidade, como já foi referido, não foi considerada a influência deste tipo de movimentos verticais para as projeções de subida do NMM relativo em Lisboa.

Com base nas taxas de subida do NMM da série de dados do marégrafo de Cascais podese deduzir um valor de aceleração e determinar um modelo polinomial de segunda ordem que projeta para o futuro próximo a subida do NMM. As taxas de subida do NMM apresentadas na Figura 7, de 2.1 mm/ano e 4.0 mm/ano, resultam no modelo apresentado na Figura 9. A estimativa central deste modelo, Mod.FC_2, representa uma projeção de perigosidade intermédia, com valor de $1.13 \pm 0.2 \text{ m}$ para 2100.

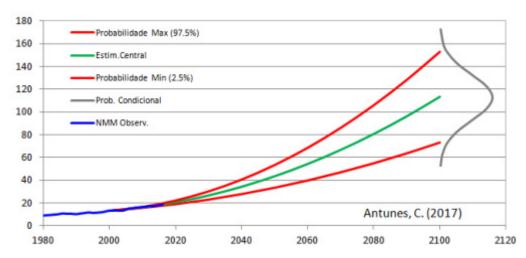


Figura 9.Modelo de projeção do NMM (em cm), Mod-FC_2 de perigosidade intermédia, com respetivas curvas de probabilidade máxima e mínima, e respetiva curva de probabilidade condicional, sobreposto com a curva de observação do NMM do marégrafo de Cascais (azul).

O processo de estimação das taxas de variação linear obtidas por regressão linear permite estimar a incerteza das respetivas estimativas. Por aplicação da propagação de erros, estima-se a incerteza da aceleração e, consequentemente, as incertezas dos valores de projeção da subida do NMM de um dado modelo. Desta forma determinam-se os limites de probabilidade máxima e mínima de uma dada estimativa central de projeção, para uma confiança de 95%. A Figura 9mostra a projeção do modelo de perigosidade intermédia, Mod.FC_2,para o qual existe uma probabilidade de 95% de o NMM se situar em 2100 entre 73 e 153 cm, com um valor médio de 113 cm. À semelhança do Mod.FC_2, também todos os restantes modelos, determinados de forma similar, possuem intervalos de incerteza e de confiança estimados a partir das incertezas das estimativas dos respetivos parâmetros (taxa e aceleração da subida do NMM).

Assim, os modelos determinísticos têm uma componente probabilística associada que permitem determinar o intervalo de probabilidade do modelo para um dado período de projeção. Este intervalo de probabilidade é fundamental para determinar a incerteza de futuros cenários de inundação extrema para a produção de cartografia de suscetibilidade à inundação ribeirinha da cidade de Lisboa.

Com base nos dados mais recentes do marégrafo de Cascais, correspondente aos últimos 30 anos, podem-se determinar diferentes taxas de subida do NMM e, consequentemente, respetivas acelerações. Dependendo do modelo e do período de dados considerado,





podem-se obter diferentes projeções de subida do NMM para essa série de dados. Assim, foram considerados quatro modelos de projeção determinística estimados pela FCUL, designados de Mod.FC_0, Mod.FC_1, Mod.FC_2 e Mod.FC_3 (Figura 10).

O primeiro modelo, Mod.FC_0, resulta da extrapolação linear com base na taxa média dos últimos 16 anos, de 3.2 mm/ano, o único com aceleração nula. O segundo modelo, Mod.FC_1, resulta do ajustamento de um polinómio de 2º grau à curva de tendência do NMM de Cascais dos últimos 36 anos. O terceiro modelo, Mod.FC_2, é obtido a partir das taxas mais recentes, de 2.1 mm/ano e 4.1 mm/ano (Figura 7), determinando-se a aceleração por diferenças finitas. O quarto modelo, Mod.FC_3, assume-se como taxa mais recente (para os últimos 10 anos), a taxa de subida do NMM global obtida por satélite e deduzida do uplift de 0.2 mm/ano, resultando uma aceleração deduzida da taxa inicial de Cascais e da taxa da série de dados de satélite.

A Tabela 1(§ Sumário Executivo)apresenta os valores numéricos do NMM projetado para 2020, 2050 e 2100, destes quatro modelos determinísticos baseados nos dados observados no marégrafo de Cascais e projetados na Figura 9.

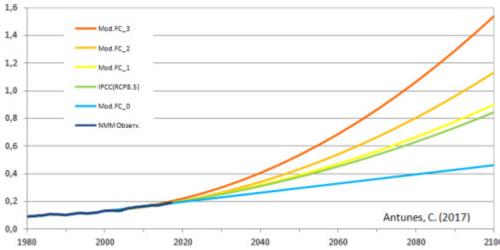


Figura 10. Modelos de projeção de subida do NMM (em metros)da FCUL, inferidos a partir dos dados da série do marégrafo de Cascais, sobrepostos com a curva de tendência do NMM observado (azul escuro) e com o modelo de projeção RCP8.5 do IPCC (verde).

Para se compreender a origem da subida do NMM global e entender a possibilidade de cenários mais gravosos, a Figura 11mostra a contribuição das principais componentes da subida do NMM global projetadas para o NMM de Cascais e considerando o cenário do Mod.FC_2.

Considerando a elevada inércia dos oceanos à resposta do aquecimento global, a componente de maior variabilidade e suscetibilidade no curto e médio prazo é a componente de aumento de massa oceânica. É também a componente que apresenta maior incerteza, de acordo com o relatório AR5 do IPCC. O mesmo relatório do IPCC refere que os modelos apresentados não contemplam a possibilidade do eventual colapso do sistema de glaciares da Antártida, por existir uma probabilidade média de tal não ocorrer antes de 2100 [Church et al., 2013]. Por outro lado, é exatamente a possibilidade dessa eventual ocorrência que levou a NOAA, no seu relatório sobre a avaliação dos cenários futuros da subida do NMM, a adicionar à lista do seu anterior relatório de 2012 um cenário Extremo de 2.5 m até 2100.





A Antártida tem verificado uma estabilidade do seu volume de gelo nos últimos 37 anos, desde que há registos de satélite, apresentando até um ligeiro aumento. Contudo, o aumento da temperatura verificado nas camadas superficiais dos oceanos poderá inverter essa tendência [Hansen *et al.*, 2016], começando este sistema de glaciares a debitar para o oceano maiores quantidades de gelo a taxas progressivamente superiores.

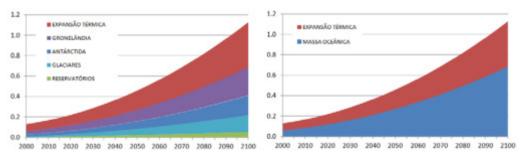


Figura 11.Projeção das componentesde subida do NMM em Cascais (em metros), baseado nas estimativas do relatório AR5 do IPPC e aplicados ao cenário intermédio do Mod.FC_2 (de 1.13 m até 2100).

É dentro desta perspetiva, o da possibilidade mesmo que remota de um eventual colapso dos glaciares da Antártida, que se devem considerar cenários extremos, mais gravosos do que os cenários mais prováveis, para a avaliação da vulnerabilidade das zonas costeiras e ribeirinhas no âmbito das estratégias municipais de adaptação às alterações climáticas.

2.3. Definição dos cenários futuros de inundação ribeirinha

2.3.1. Máximos e níveis extremos

Considerando as projeções de subida do NMM para Cascais (Figura 10), dos quatro modelos da FCUL, o cenário RCP8.5 do IPCC e os dois cenários mais extremos da NOAA, e adicionando o valor de Preia-mar máxima do ano de referência (2015) da maré de Lisboa, é possível projetar a máxima PM até 2100 para cada um dos cenários considerados.

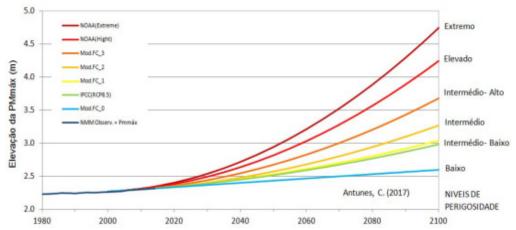


Figura 12. Projeções da Máxima Preia-mar em Lisboa (em metros), com base nas projeções de subida do NMM, quatro modelos da FCUL, o cenário RCP8.5 do IPCC e dois cenários extremos da NOAA. Com indicação dos níveis de perigosidade, de Baixo a Extremo, para cada modelo de projeção.

A Figura 12 apresenta estes vários cenários para os extremos de maré, os quais deverão servir como referência, depois de adicionados os períodos de retorno dos extremos meteorológicos, para as medidas de adaptação da cidade de Lisboa às alterações climáticas





devido à subida do NMM (Tabela 2 de § Sumário Executivo). A partir das curvas representadas na Figura 12, extraem-se os valores determinados para as épocas de 2050 e 2100 de cada modelo, apresentados na Tabela 4.Estes valores representam extremos de maré, correspondentes à MPMAVE, para cada modelo de projeção de subida do NMM.

Tabela 4. Valores de projeção dos máximos de Maré astronómica (em metros), dos vários cenários de perigosidade (Figura 12), para 2050 e 2100, relativos ao Datum Vertical Cascais 1938, sem sobreposição do efeito de eventos meteorológicos extremos.

Ano	Mod.FC_0	IPCC (RCP8.5)	Mod.FC_1	Mod.FC_2	Mod.FC_3	NOAA (Hight)	NOAA (Extreme)
2050	2.44	2.52	2.53	2.57	2.68	2.82	2.94
2100	2.60	2.99	3.04	3.27	3.68	4.25	4.75

2.3.2. Cenários de inundação para 2050 e 2100

A determinação de cenários de inundação extrema é realizada a partir de uma maré extrema de referência atual, do ano de 2015. A maré de 2015 corresponde a uma maré na qual a MPAVE verifica o ciclo de valores máximos com períodos de 4 a 5 anos, chamados de períodos quatri-nodais (1/4 do período nodal de 18.6 anos, representado na Figura 3).Os níveis de maré relativo aos eventos extremos resultam da conjugação dos fatores de maré, de sobrelevação meteorológica, de subida do NMM e do efeito de *setup* do vento. Assim, foram definidos diferentes cenários para a produção de cartografia de perigosidade associada aos níveis extremos de inundação. Cada cenário será associado ao respetivo modelo de projeção de subida do NMM.

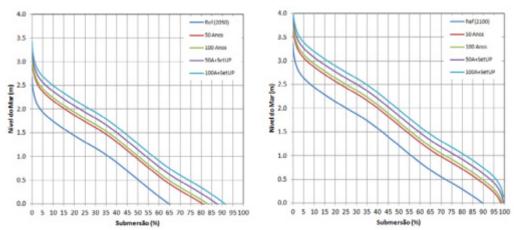


Figura 13. Curvas de percentil de submersão de altitudes de terreno, para 2050 (esquerda) e 2100 (direita), e para diferentes cenários com períodos de retornos de 50 e 100 anos de SM e setup de vento.

A determinação da curva de frequência acumulada de submersão de cotas de terreno relativamente aos níveis de elevação da maré de referência permite definir extremos de maré. Adicionando um dado valor de subida do NMM a essa curva obtém-se a curva de referência para o respetivo período de cenário, de 2050 e 2100 no presente estudo. A partir destas curvas de percentil de submersão podem ser adicionados outros fatores associados aos períodos de retornos de eventos extremos, que conjugados com os extremos de maré geram níveis extremos de sobrelevação da maré. A Figura 13 apresenta as curvas de percentil de submersão para 2050 e 2100, usando o modelo de projeção Intermédio





(Mod.FC_2) de subida do NMM e períodos de retorno de extremos de 50 e 100 anos, tal como recomendado pela Diretiva 2007/60/CE.

A partir da curva de percentagem de submersão anual (Figura 13) são retirados os extremos de maré com e sem efeitos de sobrelevação. A Tabela 5 apresenta os valores extremos da maré para a submersão de 0.1%, correspondentes ao nível de elevação da MPAVE para os períodos de 2050 e 2100 e relativos aos dois modelos de subida do NMM considerados neste estudo, o mais provável e o extremo. A coluna de "Ref." refere-se ao máximo de elevação maré sem efeitos de sobrelevação, as restantes com efeitos de sobrelevação meteorológica e *setup* de vento para períodos de retorno de 50 e 100 anos, respetivamente.

Tabela 5. Valores dos cenários de sobrelevação da maré devido aos efeitos extremos de sobrelevação meteorológica e *setup* do vento, para dois modelos de projeção do NMM, em metros e relativos ao *datum* vertical nacional (Cascais1938).

Modelos NMM			2050	2100		
		Ref.	PR 50 anos	Ref.	PR 100 anos	
Mod.FC_2	a) M+SM	2.53	3.0	3.23	-	
	b) M+SM+ <i>Setup</i>	2.55	-	3.23	4.0	
NOAA (Extreme)	a) M+SM	2.90	3.3	4.70	-	
	b) M+SM+ <i>Setup</i>	2.90	-	4.70	5.5	





Capítulo 3 – Cartografia de Inundação e Vulnerabilidade

3.1. Modelo digital de terreno

O Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado neste trabalho foi obtido a partir dos pontos cotados provenientes do Projeto: "Aquisição de Serviços p/ a Produção de Ortofotografia à Escala 1:1000 para o Concelho de Lisboa", realizado em 2016 para a Câmara Municipal de Lisboa. A Divisão Municipal de Urbanismo facultou aos autores deste estudo, cerca de315 ficheiros no formato *DWG* (formato nativo do AutoCAD) com um total de 287817 pontos cotados.

De modo a produzir um MDT, esses pontos serviram de base para a produção de um modelo TIN (*Triangular Irregular Network*) em ambiente SIG, o qual foi posteriormente convertido numa grelha *raster*. A partir desse modelo com resolução de 1 metro produziu-se assim o MDT usado neste estudo. A Figura 14mostra o MDT obtido evidenciando a orografia do concelho de Lisboa, cujas cotas apresentam valores até aos 214.6 m.

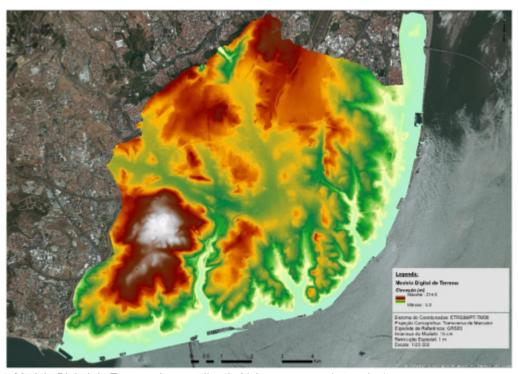


Figura 14. Modelo Digital de Terreno do concelho de Lisboa, com resolução de 1 m.

3.1.1. Validação

O controlo da qualidade altimétrica é indispensável neste processo de avaliação de risco de inundação devido ao efeito de sobrelevação da maré, de modo a compatibilizar o MDT com a referência do *datum* vertical subjacente ao modelo de maré e de subida do NMM. As cotas dos pontos usados para a produção do MDT foram obtidas por métodos fotogramétricos e, apesar destes métodos serem eficientes e precisos, não estão "livres" de erros [Höhle and Höhle, 2009], nomeadamente, de erros de exatidão relativos ao referencial vertical que apesar de terem pouca influência na cartografia topográfica, por estarem dentro da precisão dos respetivos métodos, são de extrema importância no âmbito da avaliação deste projeto.





A validação do MDT foi realizada por dois processos distintos. Primeiro, em gabinete foi realizada a comparação direta entre o MDT produzido e um conjunto de marcas de nivelamento (num total de 39 marcas selecionadas), pertencentes à rede nacional de nivelamento da Direção Geral do Território (DGT) e à rede de nivelamento de apoio da Administração do Porto de Lisboa (APL). Numa segunda fase, foi realizada uma validação do MDT por comparação dos valores das cotas desse modelo com os valores da cota de pontos obtidos pela observação no terreno pelo método RTK de GNSS, com ligação à rede RENEP da DGT e com recurso ao modelo de geoide disponibilizado (GeodPT2008). As altitudes ortométricas destes pontos foram verificadas sem marcas de nivelamento geométrico.

Comparando os valores altimétricos (altitude ortométrica - H_{marcas}) das marcas de nivelamento com os valores correspondentes do MDT produzido, obteve-se um conjunto de resíduos como estimativas do respetivo erro do modelo altimétrico, da seguinte forma:

$$residuo = h_{MDT} - H_{marcas} \tag{1}$$

Uma análise estatística destes resíduos calculados com as marcas de nivelamento permitiu obter um desvio padrão de 14 cm, correspondendo à estimativa de precisão do MDT, e uma média residual de 0.07 cm, correspondente ao desvio absoluto do modelo relativo ao referencial altimétrico de referência (*Datum* Vertical Cascais1938).

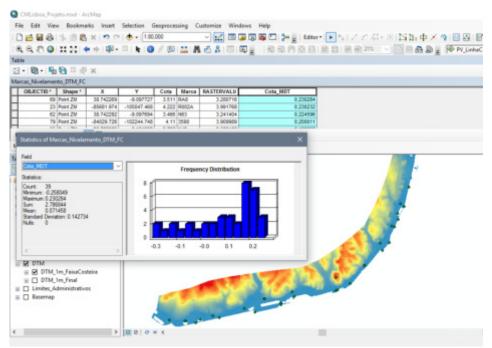


Figura 15. Localização das marcas de nivelamento e respetiva estatística da validação do MDT.

A fim de compatibilizar os referenciais altimétricos das diferentes fontes de informação que contribuem para a estimativa dos cenários de inundação, o MDT foi corrigido da média dos resíduos para que este corresponda ao mesmo referencial usado no modelo de maré e do NMM.

O trabalho de campo realizado, consistiu na coordenação de pontos especificamente escolhidos, a fim de validar e comprovar as cotas do MDT, os níveis de perigosidade de inundação e os valores do modelo de maré. Com recurso ao método de posicionamento





RTK de GNSS (Figura 16), verificado em marcas de nivelamento, foram coordenados 11pontosde controlo de qualidade do MDT, 24 pontos de verificação dos níveis de cenário de inundação e 9 pontos de validação do nível de maré em fase próxima de preia-mar. As localizações destes pontos de validação externa encontram-se distribuídos ao longo da zona ribeirinha, desde Algés até à foz do Rio Trancão, tal como mostra a Figura 17.



Figura 16. Realização do trabalho de campo com medições de GPS para validação do MDT, dos cenários de inundação e dos níveis de maré.

A análise estatística permitiu verificar e confirmar a precisão e exatidão do MDT final, com 15cm de erro médio quadrático e erro médio absoluto de 8 cm (Anexo 1–página 46).



Figura 17. Distribuição dos pontos de medição GPS para validação do MDT, dos cenários de inundação e dos níveis de maré.

Dos 39 pontos escolhidos para validação dos níveis de inundação do cenário de subida do NMM Mod.FC_2 para 2100, somente 2 não se encontram dentro do intervalo





correspondente quando medidos pelo GPS, uma vez que correspondem a zonas de transição do cenário. Apesar da percentagem reduzida de pontos erradamente classificados (5%), fica comprovada a validade da classificação de perigosidade de inundação do respetivo cenário (Figura 18) em 95% dos pontos de validação.



Figura 18. Distribuição dos pontos de medição GPS para validação dos cenários de inundação, bem como a sua classificação consoante a medição direta GPS.

A diferença das medições da elevação de maré relativamente ao modelo de maré da FCUL para o porto de Lisboa, apresenta um erro médio quadrático de apenas4 cm e um erro absoluto de -2 cm. Dada a imprecisão de medição direta com GPS sobre o nível de água oscilante, devido à ligeira agitação marítima que se fazia sentir no dia das medições, estes resultados são de elevada qualidade e validam a exatidão e precisão do modelo de previsão de maré.

3.2. Cartas de inundação

As cartas de inundação produzidas neste trabalho mostram uma representação probabilística e não determinística, onde os níveis de inundação causados pela sobrelevação da maré devido à subida do NMM e em situação de eventos meteorológicos extremos são apresentados na forma de probabilidade ou níveis de inundação provável. Os níveis de probabilidade de inundação são determinados a partir da incerteza dos níveis de inundação determinístico e classificados na forma de índice de perigosidade de inundação, com níveis de 1 a 5, correspondentes aos 5 intervalos de probabilidade de 20% de amplitude.

3.2.1. Índice de perigosidade de inundação

De modo a determinar a perigosidade de inundação em cenários de subida do NMM, com recurso ao MDT usado de 1 m de resolução espacial, é calculado o desnível de inundação





em cada ponto do terreno, correspondente à altura de coluna de água da zona inundada (2) e estimada a sua incerteza com base nas incertezas dos respetivos parâmetros.

$$h_{coluna\ de\ \acute{a}gua} = cota_{cen\acute{a}rio\ de\ inundaç\~{a}o} - cota_{MDT}$$
 (2)

Para calcular um Índice de Perigosidade da Inundação (IPI), de 1 a 5 associados aos respetivos intervalos de probabilidade de inundação, consideram-se as incertezas dos respetivos modelos(Tabela 6): de frequência de submersão, resultante da estimativa do desvio padrão dos níveis máximos de maré; de subida do NMM e da SM; bem como, a incerteza do MDT, em que cada valor de incerteza do cenário depende do ano de projeção.

$$\sigma_{cen\acute{a}rio} = \sqrt{\sigma_{mar\acute{e}}^2 + \sigma_{NMM}^2 + \sigma_{SM}^2 + \sigma_{MDT}^2}$$
 (3)

Tabela 6.Desvio padrão (em cm) de cada cenário de inundação, para as projeções do Mod.FC_2 (Intermédio) e da NOAA (Extremo), a partir das componentes que compõem o nível de inundação: a) maré; b) subida do nível médio do mar; c) sobre-elevação meteorológica; e, d) modelo digital de terreno.

Ano	Cenário	$\sigma_{mar ext{\'e}}$	σ_{NMM}	σ_{SM}	σ_{MDT}	$\sigma_{cencute{ario}}$
2050	Mod.FC_2	5	10	9	20	25
	NOAA	5	16	9	20	28
2100	Mod.FC_2	5	40	15	20	47
	NOAA	5	66	15	20	71

Com base nas incertezas estimadas por (3) são calculadas curvas padrão de distribuição Normal, a partir das quais se determina a probabilidade de inundação centrada no valor de cota. Dividindo o domínio de probabilidade em cinco níveis obtêm-se os IPI, de 1 (menor probabilidade, de 0 a 20%) a 5 (máxima probabilidade, de 80 a 100%), relativos ao forçamento costeiro de inundação (Tabela 7).

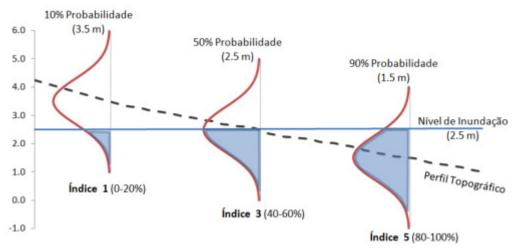


Figura 19. Método de determinação da probabilidade de inundação de um dado local (1.5 m, 2.5m e 3.5 m de cota)e respetivo índice de perigosidade, relativamente ao máximo de maré sobrelevada (exemplo de nível de inundação de h= 2.5 m) e baseado na incerteza dos respetivos parâmetros.

A Figura 19 mostra a distribuição de probabilidade de inundação centrada no valor de cota de um perfil topográfico, onde se pode verificar que mesmo em zonas de cota superior ao nível determinístico de inundação, dado pela fórmula (2), pode-se ter uma probabilidade de inundação, devido à incerteza dos parâmetros usados para a estimar. Quanto mais precisos forem os dados e os modelos, menor área sobrelevada será classificada com perigosidade.





Contudo, há limites mínimos para a precisão dos modelos e dos dados, nomeadamente, é difícil obter-se um MDT com precisões superiores a 20 cm, mesmo a partir de dados Lidar (*Light Detection and Ranging*). A maior incerteza considerada provém das projeções de subida do NMM, especialmente para períodos mais longínguos, tal como mostra a Tabela 6.

Tabela 7.Classificação do parâmetro "Forçamento Costeiro" no Índice de Perigosidade de Inundação, com base na probabilidade de cada cenário de inundação.

Índice de	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Extremo	
Perigosidade	1	2	3	4	5	
Forçamento Costeiro	≤ 20%	20% - 40%	40% - 60%	60% - 80%	≥ 80%	

Com base na curva de probabilidade de inundação de cada cenário foram obtidos os intervalos das cotas de inundação para cada nível do IPI (Tabela 8). A cada valor de desnível de cota, relativa ao nível de referência (valor extremo de inundação), corresponde um valor de probabilidade de inundação. Centrando-se a curva de distribuição de probabilidade no valor da cota de terreno, determinam-se as cotas mínimas e máximas de cada intervalo de probabilidade correspondente aos cinco níveis de perigosidade de inundação.

Tabela 8.Intervalos de cotas de inundação de cada nível de IPI e respetiva probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM do Mod-FC_2 e da NOAA (Extreme), para 2050 com 50 anos de PR de SM e sem *setup*, e para 2100 com 100 anos de PR de SM e com *setup* (Tabela 5).

	Mod.FC_2 (Intermédio)				NOAA (Extreme)			
Probabilidade de Ocorrência	2050 Ref=3.0m		2100 Ref=4.0m		2050 Ref=3.3m		2100 Ref=5.5m	
Ocorrencia	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
0,1% a 20%	3.25	3.90	4.55	5.50	3.55	4.20	6.35	7.30
20% a 40%	3.05	3.25	4.10	4.55	3.35	3.55	5.75	6.35
40% a 60%	2.95	3.05	<u>3.85</u>	<u>4.10</u>	3.25	3.35	5.30	5.75
60% a 80%	2.80	2.95	2.50	3.85	3.10	3.25	3.70	5.30
≥ 80%		2.80		2.50		3.10		3.70
Incerteza do cenário	25	ст	46	ст	28	ст	71 cm	

Os valores a negrito e sublinhados na Tabela 8indicam o intervalo dos extremos de inundação com probabilidade entre 40 e 60% para o cenário de subida do NMM dado pelo modelo Mod.FC_2, de perigosidade intermédia. O valor de referência de 4.0 m, para o cenário de 2100 com efeito extremos de SM e *setup* para períodos de retorno de 100 anos, corresponde aos 50% de probabilidade de inundação, dentro do intervalo que vai dos 2.50 (100%) a 5.50 m (0 %). Os valores sublinhados e a negrito nesta tabela, de 3.85 e 4.10 m, devem servir como indicadores de referência para as medidas de adaptação no âmbito da EMAAC de Lisboa.

3.2.2. Resultados da avaliação de inundação e submersão

A avaliação dos cenários de inundação centrou-se na contabilização das áreas com probabilidade de inundação para os dois cenários de subida do NMM considerados. Para tal, foram consideradas as dez freguesias ribeirinhas (Anexo 2) afetadas pela subida do NMM, com um total de 31.84 Km².





3.2.2.1. Cenário para 2050

Em 2050, estimou-se 11.3% de área ribeirinha afetada pela subida do NMM no cenário intermédio, enquanto que para o pior cenário (*Extreme* da NOAA com subida do NMMde2.61 m) a área provável afetada passará para os13.9%.

Tabela 9. Áreas das freguesias com probabilidade de inundação para o ano de 2050.

DICOFRE	Freguesia	Área da Freguesia (Km²)	Área [Mod.FC_2]	Área [NOAA]
110660	Estrela	2.83	22.1%	25.7%
110661	Misericórdia	1.11	25.1%	27.6%
110665	Santa Maria Maior	1.48	21.4%	24.3%
110658	Belém	5.72	15.3%	17.5%
110667	São Vicente	1.25	4.5%	9.2%
110602	Alcântara	4.43	10.0%	11.0%
110663	Penha de França	2.20	2.8%	5.4%
110607	Beato	1.71	14.6%	20.8%
110621	Marvila	6.27	5.8%	7.6%
110662	Parque das Nações	4.83	6.8%	9.7%

As duas freguesias que poderão ser mais afetadas em 2050 são a Misericórdia e Santa Maria Maior (nos dois cenários),como mostra Tabela 9, de 25.1% e 27.6%, respetivamente, para o cenário intermédio (Mod.FC_2) e para o cenário extremo da NOAA.

Dado que o cenário intermédio (Mod.FC_2) é considerado o mais provável em relação ao cenário extremo da NOAA, apresenta-se a carta de submersão permanente para esse mesmo cenário. A Figura 20 mostra, para cada cota de percentil de submersão, o número de horas no ano, em 2050, que estarão permanentemente inundadas em fases de PM máxima face a este cenário. Observando-se neste cenário apenas algumas áreas de cota relativamente baixa, eventualmente, resultantes de loteamentos em fase de escavação de alicerces para futura construção.







Figura 20. Cotas de percentil de submersão para 2050 para o cenário intermédio Mod.FC_2.

A Figura 21 e Figura 22 permitem visualizar, para 2050, a probabilidade de ocorrência dos cenários de inundação presentes na Tabela 9 para a totalidade do concelho de Lisboa. Os cortes de pormenor das figuras permitem identificar a linha do comboio como uma das infraestruturas afetadas pelos cenários de inundação extrema. No caso do cenário baseado na projeção do NMM do Mod.FC_2, apesar da probabilidade de inundação desta infraestrutura ser relativamente baixa (entre 20% e 40%) este facto deve constituir uma preocupação, dada a sua elevada importância para a cidade. No entanto, já para a projeção de subida extrema do NMM da NOAA, a probabilidade de inundação dessa infraestrutura sobe para valores de 60 a 80%.





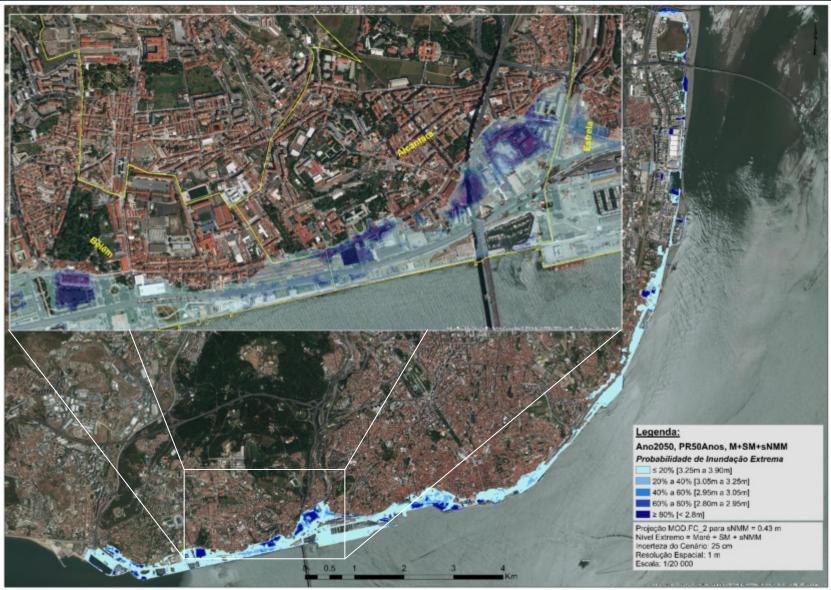


Figura 21. Probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM Mod.FC_2 para o ano de 2050 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 50 anos.





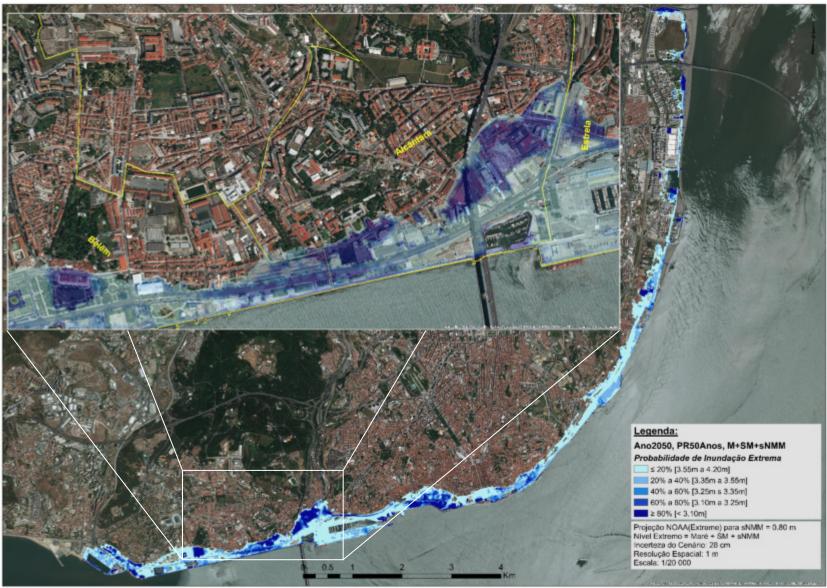


Figura 22. Probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM NOAA (*Extreme*) para o ano de 2050 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológica com período de retorno de 50 anos.





3.2.2.2. Cenário para 2100

O cenário para 2100 é definido para uma situação extrema de SM e *setup* com períodos de retorno de 100 anos. Em 2100 prevê-se uma subida do NMM de 1.13 m para a projeção intermédia (Mod.FC_2) e de 2.61m para a projeção extrema (NOAA), o que traduz, naturalmente, uma maior área inundada no concelho de Lisboa face a 2050.

Para 2100, contabiliza-se uma área de 18.3% da zona ribeirinha afetada para a projeção intermédia, enquanto que para a projeção extrema a área afetada passa a ser de 21.6%. A Tabela 10apresentaa área com probabilidade de inundação para as duas projeções de subida do NMM em cada freguesia.

Tabela 10. Áreas das freguesias com probabilidade de inundação para o ano de 2100.

DICOFRE	Freguesia	Área da Freguesia (Km²)	Área [Mod.FC_2]	Área [NOAA]
110660	Estrela	2.83	27.6%	30.2%
110661	Misericórdia	1.11	30.3%	31.2%
110665	Santa Maria Maior	1.48	28.5%	31.6%
110658	Belém	5.72	21.0%	23.0%
110667	São Vicente	1.25	11.8%	12.3%
110602	Alcântara	4.43	12.4%	13.7%
110663	Penha de França	2.20	8.2%	8.9%
110607	Beato	1.71	24.3%	26.4%
110621	Marvila	6.27	9.1%	9.7%
110662	Parque das Nações	4.83	25.3%	38.4%

Mais uma vez, a freguesia da Misericórdia é a mais afetada no cenário intermédio, porém, no cenário extremo a freguesia do Parque das Nações é a que apresenta maior percentagem de área com probabilidade de inundação (38.4%). A freguesia que tem maior probabilidade de inundação (IPI = 5, superior a 80%) no cenário mais extremo é a da Misericórdia, com 22.9%.

As Figura 25 e Figura 26 (páginas 35e 36respetivamente) permitem visualizar, para 2100, a probabilidade de ocorrência dos cenários de inundação presentes na tabela anterior, para a totalidade do concelho de Lisboa.

Para o ano de 2100 são apresentados os dois cenários com as cotas dos percentis de submersão, ou seja, para cada cota o número de horas no ano de 2100 que estarão inundadas em fase de PM máxima face a cada um dos cenários considerados (Figura 23 e Figura 24), apenas sob o efeito da maré, sem qualquer sobrelevação da maré de origem meteorológica extrema.





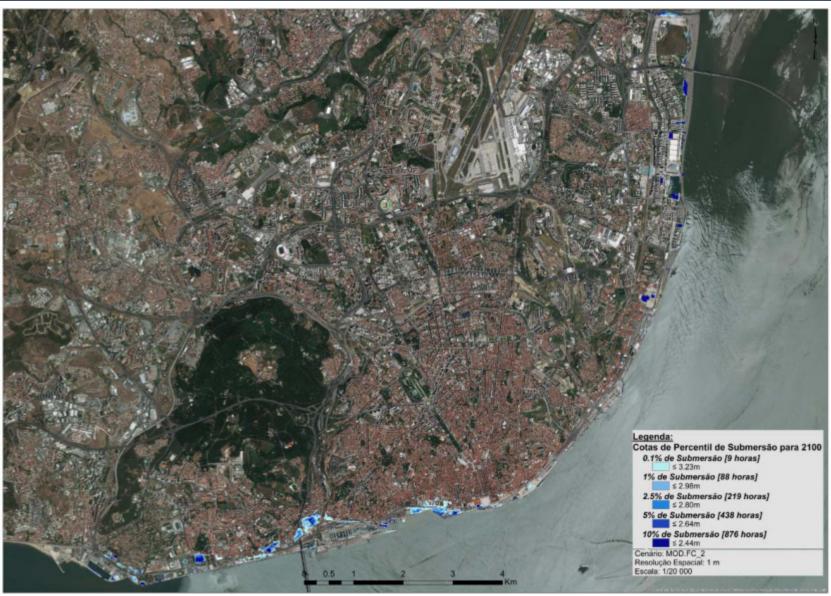


Figura 23. Cotas de percentil de submersão para 2100 para o cenário intermédio Mod.FC_2.







Figura 24. Cotas de percentil de submersão para 2100 para o cenário NOAA (Extreme).





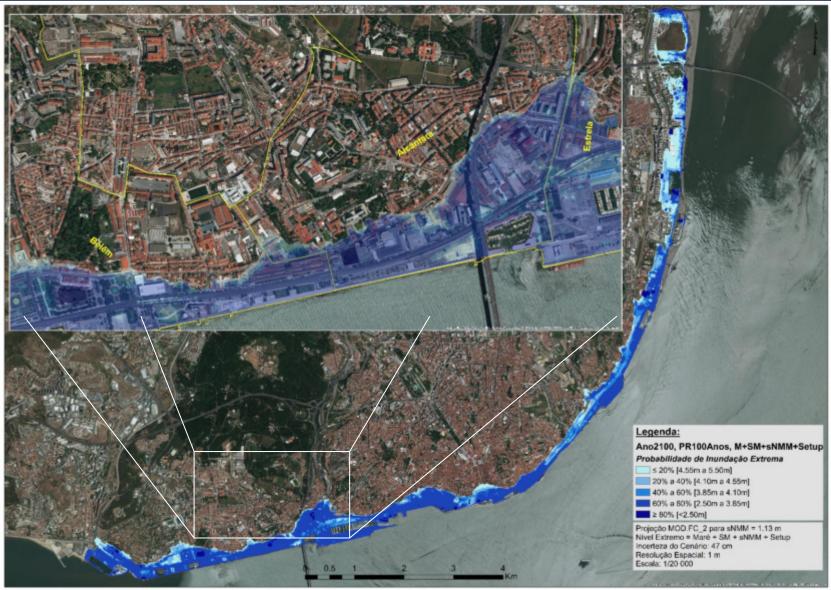


Figura 25. Probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM Mod.FC_2 para o ano de 2100 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológicacom período de retorno de 100 anos.





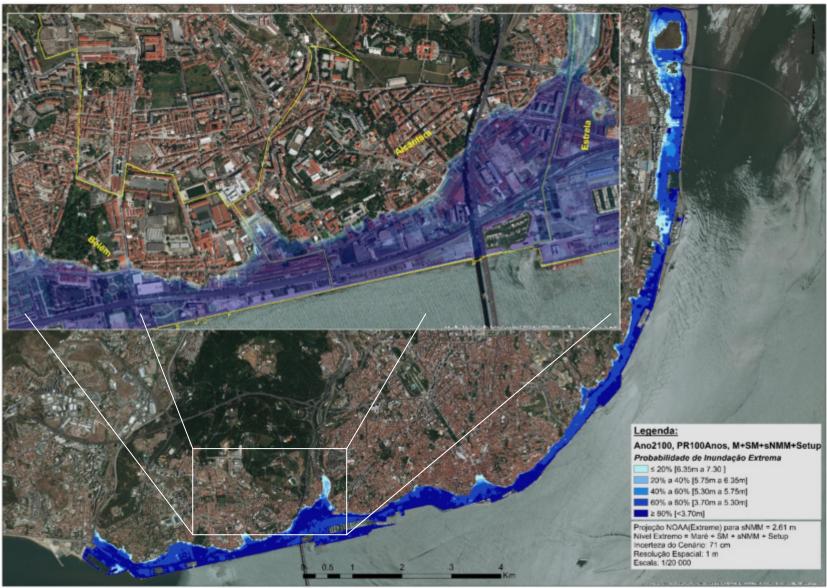


Figura 26. Probabilidade de ocorrência para o cenário de subida do NMM NOAA para o ano de 2100 de nível extremo de maré mais sobrelevação meteorológicacom período de retorno de 100 anos.





3.3. Cartas de vulnerabilidade física

A análise das vulnerabilidades e dos riscos de uma zona costeira/ribeirinha e das suas evoluções ao longo do tempo, em relação à subida do NMM e às ações energéticas do mar, é fundamental para a gestão e ordenamento do território de modo a permitir a adoção de políticas de gestão com vista à adaptação adequada da ocupação costeira.

"Entende-se como vulnerabilidade das zonas costeiras às ações energéticas do mar como a predisposição a um dado risco, englobando diversos elementos e conceitos, como a sensibilidade ou suscetibilidade ao dano e a falta de capacidade para se adaptar. O risco é definido como o produto da probabilidade de ocorrência de um acontecimento potencial (indesejado), pela consequência (indesejada) associada a esse acontecimento, resultando assim da interação da vulnerabilidade, exposição e perigo".[IPCC,2014]

A escolha dos parâmetros de vulnerabilidade pode ser complexa e depende muito da análise que se pretenda realizar. Para este estudo foram então selecionados quatro parâmetros de vulnerabilidade física, para serem avaliados e classificados individualmente. Cada um dos parâmetros será classificado numa escala de 1 a 5, de modo a expressar o seu contributo para a vulnerabilidade costeira, sendo 5 o nível mais alto e 1 o mais baixo.

3.3.1. Índice de vulnerabilidade

O processo metodológico aplicado neste trabalho está esquematizado na Figura 27. A primeira fase corresponde à recolha e organização da informação necessária à construção do modelo de dados. A segunda fase corresponde ao tratamento da informação de modo a conseguir incorporá-la e harmonizá-la no modelo. Estes dados foram tratados através de funções SIG de modo a obter mapas normalizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade física. O resultado final são dois mapas de vulnerabilidade física para os anos de 2050 e 2100, incorporando a contribuição dos dois cenários de projeção da subida do NMM, o Mod.FC_2 e o NOAA (*Extreme*), através do IPI composto.

Para a criação do Índice de Vulnerabilidade utilizou-se o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty nos anos 70 [Barzilai, 2010]. Este método destina-se a hierarquizar um conjunto de parâmetros avaliados em função de um conjunto de critérios. Como resultado, obtêm-se os pesos dos parâmetros usados na ordenação das alternativas a partir de uma matriz onde o decisor efetua comparações de relação de importância entre os critérios (atributos) característicos das diferentes alternativas [Le Cozannet*et al.*, 2013]. Para cada parâmetro utilizado obtiveram-se os pesos apresentados na Tabela 11.

De realçar, que os resultados do método AHP dependem da perspetiva dos decisores relativamente à importância de cada critério utilizado, sendo que o respetivo resultado depende dos parâmetros de entrada para o modelo.





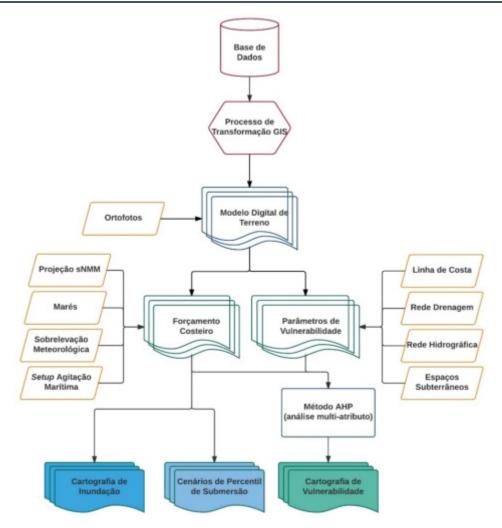


Figura 27. Fluxo do processo da metodologia para a obtenção da cartografia de vulnerabilidade da zona ribeirinha da cidade de Lisboa.

Tabela 11. Classificação dos parâmetros para o índice de vulnerabilidade, bem como os respetivos pesos atribuídos.

Índice de Vulnerabilidade						
Parâmetros	1	2	3	4	5	Peso
Linha de costa	240m a 300m	180m a 240m	120m a 180m	60m a 120m	> 60m	19%
Rede de Drenagem	40m a 50m	30m a 40m	20m a 30m	10m a 20m	>10m	11%
Rede Hidrográfica	80m a 100m	60m a 80m	40m a 60m	20m a 40m	> 20m	8%
Espaços Subterrâneos	não tem				tem	4%
Perigosidade de inundação	< 20%	20% a 40%	40% a 60%	60% a 80%	> 80%	57%

3.3.2. Resultados da avaliação de vulnerabilidade

O modelo de cálculo do Índice de Vulnerabilidade Física (IVF) proposto pelos autores e aplicado a cada ano (2050 e 2100) é representado pela fórmula (4), cujos pesos estão apresentados na Tabela 11.





$$IVF_{ano} = \frac{IPI \times 57\% + DLC \times 19\% + DRD \times 11\% + DRH \times 8\% + ES \times 4\%}{100\%}$$
(4)

onde, IPI – Índice de Perigosidade de Inundação composto (composição do cenário intermédio Mod.FC_2 e o cenário Extreme da NOAA), DLC – Distância à Linha de Costa, DRH – Distância à Rede de Drenagem, DRH – Distância à Rede Hidrográfica e ES – Espaços Subterrâneos. O IPI composto resulta da média pesada dos IPI de cada cenário de projeção de subida do NMM do Mod.FC_2 e da NOAA (*Extreme*), de 80 e 20%, respetivamente.

A Figura 28mostra as classes de vulnerabilidade da zona ribeirinha de Lisboa para o cenário de 2050, evidenciando as zonas de Belém e Santos-Cais do Sodré como as mais vulneráveis, com nível 3 - Moderado. Aparecendo algumas pequenas áreas nas freguesias de Marvila e Parque das Nações com níveis 4 - Alto e 5 - Extremos.



Figura 28. Índice de Vulnerabilidade física para o concelho de Lisboa no ano de 2050.

A Figura 29 mostra os níveis de vulnerabilidade para o cenário de 2100, em que toda a faixa ribeirinha, sem exceção, se apresenta vulnerável entre os níveis 3- Moderado e 5- Extremo.







Figura 29. Índice de Vulnerabilidade física para o concelho de Lisboa no ano de 2100.





Capítulo 4 - Discussão e conclusão

A avaliação da vulnerabilidade e risco à subida do NMM e dos eventos extremos de forçamento meteorológico são fundamentais para uma boa e adequada gestão do território. O conhecimento antecipado da subida do NMM, através de modelos de projeção sucessiva e permanentemente atualizados com base nos dados mais atuais, possibilita um planeamento de adaptação antecipado e, consequentemente, uma otimização e redução dos custos associados ao risco natural resultante da elevada exposição.

Apesar da maioria das projeções conhecidas e publicamente divulgadas apresentarem a subida do NMM até 2100, a comunidade científica internacional assume com algum grau de confiança que o NMM continuará a subir para lá de 2100 com a mesma aceleração, podendo prolongar-se nos próximos séculos ou mesmo no próximo milénio. Assim, as medidas de adaptação deverão contemplar as projeções futuras para períodos mais longínquos dada a prolongada exposição de infraestrutura urbanas, nomeadamente, de transporte, habitação e serviços.

A Figura 30mostra-nos as projeções da máxima Preia-mar de Águas-vivas equinociais do cenário de subida do NMM intermédio (Mod.FC_2) até 2200 sobreposto com o cenário extremo da NOAA e até à elevação de 6 metros. Esta figura mostra que enquanto o cenário extremo atinge os 6 m de elevação máxima da maré por volta do ano 2125, o cenário intermédio Mod.FC_2 atingirá essa mesma elevação pouco depois de 2200, em apenas 75 anos alcança a cota extrema de 6 m de elevação topográfica.

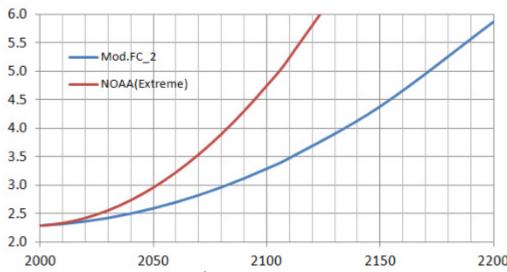


Figura 30. Projeção da máxima Preia-mar de Águas-vivas equinociais (MPAVE) de Lisboa até 2200 para os dois cenários, intermédio (Mod.FC_2) e extremo (NOAA).

Fazendo uma análise comparativa entre os cenários de subida do NMM apresentados, pode-se calcular o número de anos que um dado cenário leva a atingir o extremo de maré de uma dada cota de elevação topográfica. O gráfico da Figura 31apresenta-nos, para cada valor de elevação, de 2.5 m a 6.5 m, o intervalo de tempo que cada cenário demora para alcançar uma da elevação. Estabelecida uma dada cota de referência de planeamento urbanístico, o gráfico da Figura 31 permite-nos identificar quanto tempo leva essa cota a ser





atingida pelo máximo de maré, ou seja, quantos anos são necessários para que essa cota passe a ser inundada todos anos nos dias de Preia-mar máxima. Por exemplo, para a cota de 4.0 m de elevação topográfica, serão necessários 80 e 175 anos para os cenários NOAA (Extreme) e IPCC(RCP8.5), respetivamente, ou cerca de 130 anos para o cenário intermédio Mod.FC 2.

Sempre que uma dada infraestrutura, exposta ao risco de inundação devido à sobrelevação da maré, necessite de ser adaptada, removida ou deslocada, e em função do tempo que demora uma tal intervenção, é necessário considerar o tempo que resta até que o nível máximo de maré atinja tal infraestrutura.

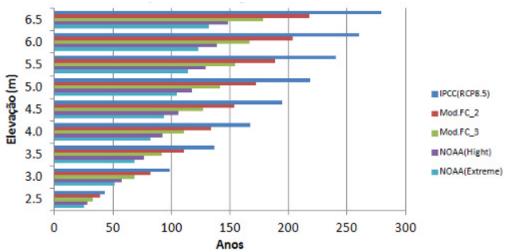


Figura 31. Número de anos necessário para a MPAVE atingir uma dada elevação em cada modelo de projeção de subida do NMM.

Para tal, é necessário definir estratégias de adaptação em função da subida do NMM. Este fator é por ventura a consequência das alterações climáticas mais previsível e tido com maior certeza. Contudo, dada a inércia da variação do NMM os impactos de tal perigosidade podem ser acautelados de forma faseada, sem a necessidade de se fazerem intervenções de engenharia pesada muito antes de tais níveis de perigosidade começarem a ocorrer.

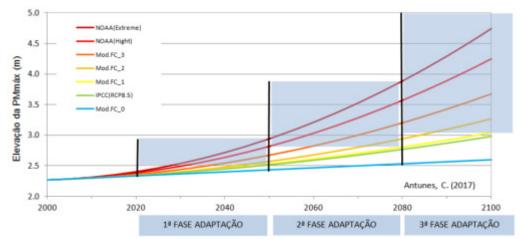


Figura 32. Fases de adaptação à subida do NMM, em função do valor e da taxa de cada cenário possível e admissível.

Baseado numa proposta de adaptação faseada apresentada no relatório de 2016 do Departamento de Defesa dos EUA, no âmbito de um programa estratégico de I&D ambiental, SERDP [Hall *et al.*, 2016], a estratégia de adaptação da cidade de Lisboa e de





qualquer outra região do país, deve seguir um planeamento em que cada fase é definida a partir da evolução da subida do NMM. A Figura 32apresenta uma proposta dos autores deste estudo para uma possível sequência de fases de adaptação, a qual poderá ser integrada na EMACC de Lisboa, em que em cada fase, correspondente a períodos de 30 anos, é definido o limite de elevação de MPAVE relativamente ao qual a zona ribeirinha deve ser reajustada e adaptada de forma a acomodar a subida progressiva da máxima maré anual, sem que a cidade possa sofrer as consequências e impactos da subida do NMM.

A Tabela 12 apresenta os valores de elevação máxima extraídos do gráfico da Figura 32, para cada fase de adaptação. A amplitude entre o valor mínimo (Mod.FC_1) e máximo (*Extreme* da NOAA) define o intervalo de elevação onde os decisores políticos e responsáveis de planeamento urbanístico devem estabelecer o valor de referência a adotar na EMAAC para cada fase de adaptação. Assim, e de acordo com a Tabela 12, até 2050 deve-se assumir um valor entre 2.5 e 2.9 m, e até 2080 deve-se assumir um valor entre 2.8 e 3.9 m. Em cada fase de adaptação todas as intervenções devem ser feitas para libertar a área ribeirinha que se situe em cota inferior à cota de referência da respetiva fase.

Conclui-se também, a partir da Tabela 12 e em conformidade com os valores indicados nas Tabela 2 e Tabela 8, bem como da Figura 13, que relativamente aos cenários Intermédio (Mod.FC_2) e Intermédio-Alto (Mod.FC_3) e para o final do século, o valor de cota máxima que garante segurança situa-se entre 3.6 m e 4.3 m (valores sublinhados e a negrito).

Tabela 12. Valores máximos de elevação da maré extrema de cada modelo para cada fase de adaptação, retirados da Figura 30 e definidos para os cenários de perigosidade da intermédia-baixa (Mod.FC_1, equivalente ao RCP8.5 do IPCC) à extrema (NOAA).

	Mod.FC_1	Mod.FC_2	Mod.FC_3	NOAA (Hight)	NOAA (Extreme)
1ª Fase (2020-2050)	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
2ª Fase <i>(2050-2080)</i>	2.8	3.0	3.2	3.6	3.9
3ª Fase <i>(2080-2120)</i>	3.3	<u>3.6</u>	<u>4.3</u>	5.1	5.8
4ª Fase <i>(2120-2160)</i>	4.0	4.6	5.7	7.1	8.4

Dado que a evolução da subida do NMM irá sendo monitorizada e os modelos de projeção sucessivamente atualizados, é previsível que parte das projeções atuais sejam descartadas e substituídas por novas projeções baseadas em novos dados. Esta monitorização permanente da variação do NMM permitirá redefinir os valores de elevação de referência das fases de adaptação seguintes, evitando tomadas de decisão precipitadas e com custos acrescidos.

Uma adaptação à subida do NMM planeada e de forma faseada, em função do conhecimento mais atual, é a estratégia mais adequada que garante o menor custo. A assunção desta estratégia realista e consciente constituirá a melhor opção com melhor razão de custo/benefício.





Referências Bibliográficas

- Abuodha, P. A. O. and C. D. Woodroffe (2010). Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensivity index: a case study from southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation*, Vol. 14:3, pp. 189-205.
- Andrade, C., H. Pires, P. Silva, R. Taborda e M.C. Freitas, Zonas Costeiras, In: Santos, F.D. e P Miranda (Eds) (2006). "Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, *Impactes* e Medidas de Adaptação SIAM II", *Gradiva*, Lisboa, Portugal, pp. 169-206.
- Antunes, C., Taborda, R. and Mendes, V. (2010). Analysis of the most recent data of Cascais Tide Gauge. Geophysical Research Abstract, Vol. 12, EGU2010-1253, EGU General Assembly 2010.
- ANPC (2010). Riscos Costeiros Estratégias de prevenção, mitigação e protecção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território" *Cadernos Técnicos PROCIV*, nº15, Portugal, p. 156.
- Antunes, C. (2007). Previsão de Marés dos Portos Principais de Portugal URL: http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html (consultado em 2016.07.07)
- Antunes, C. (2016). Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual. *Atas das 4^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, pp. 163-166.
- Barzilai, J. (2010). "Preference Function Modelling: The Mathematical Foundations of Decision Theory". In: Ehrgott, M., J. R. Figueira and S. Greco (Eds.) Trends in Multiple Criteria Decision Analysi, Springer, pp. 57-86.
- Catalão, J., Giovanni Nico, Vasco Conde, J.M. Miranda, (2011). Quantification of Subsidence Associated with groundwater flow using SAR interferometry. Proc. "Fringe 2011 Workshop", Frascati, Italy, 19-23 September 2011. ESA SP-697, January 2012, 6 p..
- Hall, J.A., S. Gill, J. Obeysekera, W. Sweet, K. Knuuti and J. Marburger (2016). Regional Sea Level Scenarios for Coastal Risk Management: Managing the Uncertainty of Future Sea Level Change and Extreme Water Levels for Department of Defense Coastal Sites Worldwide. U.S. Department of Defense, Strategic Environmental Research and Development Program. 220 p..
- Hansen J., M. Sato, P. Hearty, R. Ruedy, M. Kelley, V. Masson-Delmotte, G. Russell, G. Tselioudis, J. Cao, E. Rignot, I. Velicogna, B. Tormey, B. Donovan, E. Kandiano, K. von Schuckmann, P. Kharecha, A.N. Legrande, M. Bauer and K.W. Lo (2016). Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimatedata, climate modeling, and modern observations that 2°C globalwarming could be dangerous. Atmos. Chem. Phys., n° 16, pp. 3761–3812.
- Höhle, J. and M. Höhle (2009). "Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, nº 64, pp. 398-406.





- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifild, G.A. Milne, R.S.Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan(2013). Sea Level Change. In: ClimateChange 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of theIntergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014). Annex II: Glossary [Agard, J., E.L.F. Schipper, J. Birkmann, M. Campos, C. Dubeux, Y. Nojiri, L. Olsson, B. Osman-Elasha, M. Pelling, M.J. Prather, M.G. Rivera-Ferre, O.C. Ruppel, A. Sallenger, K.R. Smith, A.L. St. Clair, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, and T.E. Bilir (eds.)]. In: "Climate Change 2014, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1757-1776.
- Jevrejeva, S., J.C. Moore, A. Grinsted, A.P. Matthews, G. Spada (2014). Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807, Global and Planetary Change,vol 113, 10.1016/j.gloplacha.2013.12.004.
- Le Cozannet, G., M. Garcin, T. Bulteau, C. Mirgon, M. L. Yates, M. Méndez, A. Baills, D. Idier, and C. Oliveros (2013). "An AHP derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales". Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.13, pp. 1209-1227.
- Parris A., P. Bromirski, V. Burkett, D. Cayan, M. Culver, J. Hall, R. Horton, K. Knuuti, R. Moss, J.Obeysekera, A. Sallenger, and J. Weiss (2012). Global Sea Level Rise Scenarios for the USNational Climate Assessment. NOAA Tech Memo OAR CPO-1, 37 p..
- Rahmstorf S., G. Foster and A. Cazenave (2012). Comparing climate projections toobservations up to 2011. Environmental Research Letters no 7 044035, 5 p., doi:10.1088/1748-9326/7/4/044035.
- Serpelloni, E., C. Faccenna, G. Spada, D. Dong e Williams S.D.P. (2013). Vertical GPS ground motion rates in Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along de Nubia-Eurasia plate boundary. Journal of Geophysical Research: SOlid Earth, Vol. 118, 6003-6024, doi:10.1002/2013JB010102.
- Sweet, V.W, R.E. Kopp, P.C. Weaver, J. Obeysekera, M.H. Horton, E.R Thieler and C. Zervas (2017). Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083, Silver Spring, Maryland, January 2017, 77 p..
- Vieira, R., C. Antunes e R. Taborda (2012). Caracterização da sobreelevação meteorológica em Cascais nos últimos 50 anos. Actas das 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico, Lisboa 20-22 de Junho, pp. 175-178.





Anexos

Anexo 1 – Análise estatística da validação externa do DTM

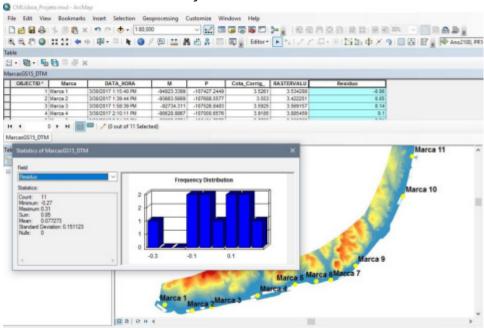


Figura 33. Número de marcas de validação externa para o DTM e desvio padrãoda respetiva validação.





Figura 34. Mapa das freguesias ribeirinhas do concelho de Lisboa.