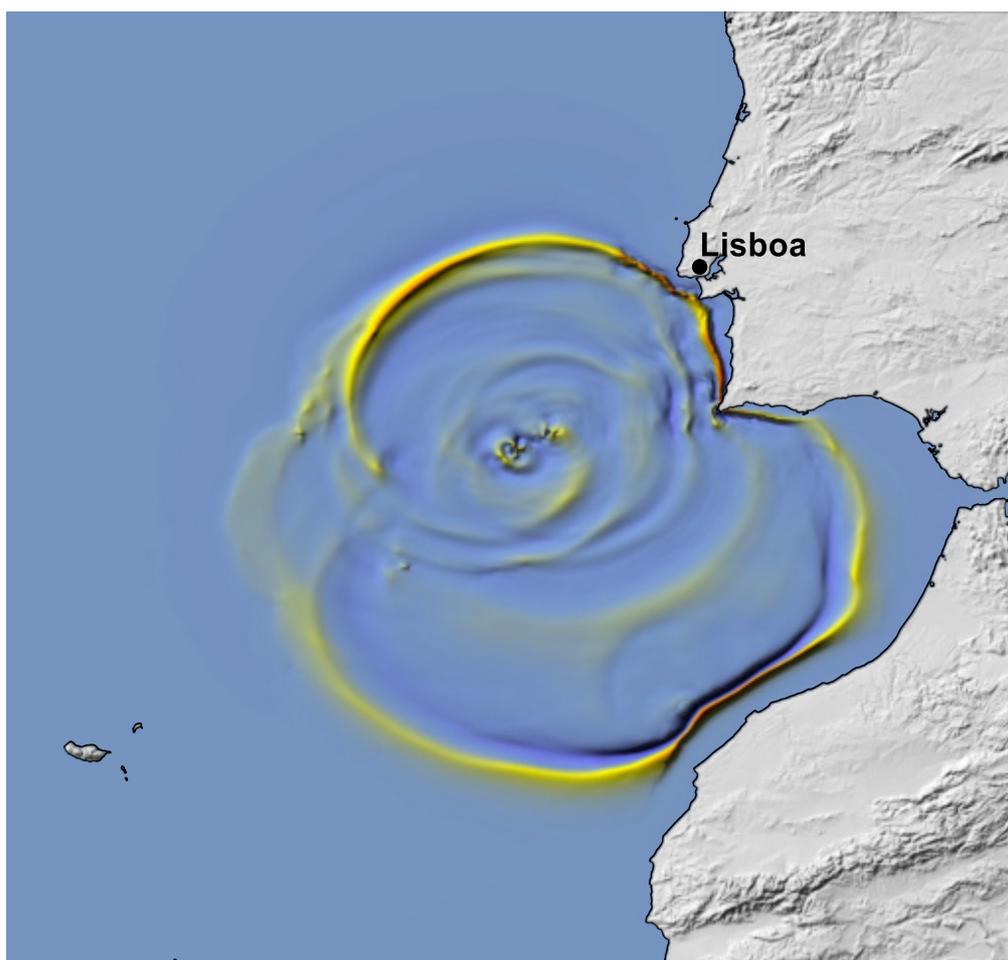


CARTAS DE RISCO DE INUNDÇÃO POR TSUNAMI PARA O MUNICIPIO DE LISBOA



Versão final
04 de junho de 2019

**MAPA DA PERIGOSIDADE DE
INUNDAÇÃO POR TSUNAMI DE ORIGEM
SÍSMICA NA CIDADE DE LISBOA**

Índice

1	Sumário Executivo	5
2	Introdução	7
3	Metodologia	7
3.1	Modelação numérica da geração e propagação oceânica do tsunami	8
3.2	Método determinístico de cálculo da perigosidade de tsunami	9
3.2.1	Método determinístico sem edificado	9
3.2.2	Método determinístico com edificado	9
3.3	Método probabilístico de cálculo da perigosidade de tsunami	11
4	Informação de Base	12
4.1	Modelo Digital do Terreno	12
4.2	Modelo digital de superfície para a simulação com edificado	13
4.3	Modelos do nível do mar	14
4.3.1	Projeções de Nível do Mar para 2050 e 2100	14
4.3.2	Modelo do nível do mar para a simulação determinística sem edificado	15
4.3.3	Modelo do nível do mar para a simulação determinística com edificado	16
4.3.4	Modelo do nível do mar para a simulação probabilística	17
4.4	Fontes Tsunamigénicas	17
4.4.1	Regiões	17
4.4.2	Base de dados de cenários tsunamigénicos determinísticos e probabilísticos	18
4.4.3	Taxa de recorrência	20
5	Resultados	20
5.1	Cartografia da inundação por tsunami – Método Determinístico	20
5.1.1	Simulação determinística sem edificado	20
5.1.2	Simulação determinística com edificado	24
5.2	Cartografia da inundação por tsunami – Método Probabilístico	31
6	Conclusões	34
	Referências	36
	Anexo A: Descrição detalhada da metodologia e dos modelos numéricos	39
A1	Limites dos níveis máximos de maré para cada cenário de NMM (FCUL)	39
A2	Método Determinístico de cáculo da perigosidade de tsunami com edificado (IST)	40
A2.1	Condições de Fronteira	41
A2.2	Descrição pormenorizada dos resultados das simulações com edificado	41
A3	Método probabilístico de cáculo da perigosidade de tsunami (IPMA)	51
A4	Avaliação da consistência dos modelos de simulação (IST e IPMA)	52
	Anexo B: Base de dados dos cenários tsunamig�nicos usados (IPMA)	53
	Anexo C: Taxas anuais de recorrência para cada valor de magnitude dentro das três zonas fonte consideradas	56

Preâmbulo

Este trabalho foi realizado por uma equipa multidisciplinar coordenada pela Professora Maria Ana Baptista. A equipa envolveu três instituições: O Instituto Português do Mar e da Atmosfera, O Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa, e o Instituto Superior Técnico

Equipa Científica

Professora Maria Ana Baptista - coordenação

IPMA

Doutor Rachid Omira

Mestre Inês Ramalho

Instituto Dom Luiz da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Professor Carlos Manuel Antunes

Mestre Carolina Rocha

Instituto Superior Técnico

Professor Rui Ferreira

Doutor Daniel Conde

Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo Digital de Terreno de Lisboa, calibrado e validado em marcas de nivelamento.	12
Figura 2 - Modelo Digital de Superfície.....	13
Figura 3 - Detalhe da discretização do Modelo Digital de Superfície para Algés e Belém (superior esquerdo), Alcântara (superior direito), Baixa Pombalina (inferior esquerdo) e Parque das Nações (inferior direito).	14
Figura 4 - Nível máximo do mar para o cenário de Extremo do NMM (NOAA) em 2100.	15
Figura 5 - Níveis de superfície livre do Estuários em Preia-Mar (esquerda) e Baixa-Mar (direita) (mínimo: verde – máximo:vermelho), conforme tabela 2).....	16
Figura 6 - Probabilidade cumulativa de excedência de níveis do mar para os cenários de 2050 e 2100.	17
Figura 7 - Fontes tsunamigénicas na área do SWIM.	19
Figura 8 - Área de inundação na zona de Lisboa para o cenário 2050.	21
Figura 9 - Profundidade de inundação da zona de Lisboa para o cenário 2050.....	22
Figura 10 - Área de inundação na zona de Lisboa para o cenário 2100.....	23
Figura 11 - Profundidade de inundação da zona de Lisboa para o cenário 2100.....	24
Figura 12 - Inundação da zona de Lisboa para o cenário 2100 com variação do nível do mar. A zona sombreada expressa a extensão da inundação decorrente do tsunami. A linha vermelha representa o limite da inundação sobre a qual o tsunami se propaga, i.e., a inundação da maré para o cenário de 2100 da NOAA.	25
Figura 13 - a) Representação esquemática do run-up no caso da propagação do tsunami com edificado e resistência parietal. b) Evolução da energia mecânica do escoamento por unidade de peso do fluido da partícula A. As parcelas da energia mecânica do escoamento por unidade de peso do fluido são a cota do terreno, Zb , a profundidade, h , e a energia cinética por unidade de peso do fluido, $U^2/(2g)$, em que U é a velocidade da partícula e g é a aceleração da gravidade. Linha azul tracejada corresponde à inundação inicial.	26
Figura 14 - a) Representação esquemática do run-up no caso da propagação do tsunami sem edificado e sem resistência parietal. b) Evolução da energia mecânica do escoamento por unidade de peso do fluido da partícula A'. As parcelas da energia mecânica do escoamento por unidade de peso do fluido são a cota do terreno, Zb , a profundidade, h , e a energia cinética por unidade de peso do fluido, $U^2/(2g)$, em que U é a velocidade da partícula e g é a aceleração da gravidade. Linha azul tracejada corresponde à inundação inicial.	27
Figura 15 - Profundidade da inundação. Cenário NOAA2100_PMmaxSM.....	29
Figura 16 - Velocidades do escoamento. Cenário NOAA2100_PMmaxSM.....	30
Figura 17 - Índice de perigosidade. Cenário NOAA2100_PMmaxSM.....	31
Figura 18 - Probabilidade de ocorrência de inundação por tsunami para o cenário 2050.	32
Figura 19 - Probabilidade de ocorrência de inundação por tsunami para o cenário 2100.	33

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tabela de valores de projeção dos vários níveis de marés, usados na elaboração das superfícies hidrostáticas de maré (valores sombreados). Em cima, cenário de nível médio do mar de perigosidade intermédia com o modelo Mod.FC_2. EM baixo, cenário de nível médio do mar de perigosidade extrema com o modelo NOAA (Extreme).....	15
Tabela 2 - Valores máximos e mínimos dos níveis no domínio de cálculo das simulações de alta resolução espacial.	16

Tabela 3 - Parâmetros das falhas da Ferradura (HSF) e do Marquês de Pombal (MPF).	19
Tabela 4 - Índice de perigosidade	30

1 Sumário Executivo

O presente relatório apresenta mapas de inundação por tsunami para o concelho de Lisboa. Este trabalho foi realizado no âmbito da revisão do Plano Diretor Municipal (PDM) para a cidade de Lisboa, pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, em colaboração com a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e o Instituto Superior Técnico.

Para tal, foram utilizados métodos determinísticos, utilizando o pior cenário possível (“worst case scenario”) e probabilísticos considerando a subida do nível do mar devida a alterações climáticas. Foram igualmente contabilizados o efeito da maré, os efeitos meteorológicos de interação oceano-atmosfera e a influência do caudal no Rio Tejo. Nos estudos determinísticos foram realizadas cartas com e sem edificado.

A escolha do pior cenário possível - cenário mais gravoso - teve como base o tsunami gerado pelo sismo de 1 de novembro de 1755 incluindo ainda os efeitos do aumento máximo do nível do mar e do estágio extremo da maré que poderão ocorrer ao longo da zona costeira de interesse.

O método de Avaliação Probabilística da Perigosidade de Tsunami (APPT) visa determinar, em função do tempo, e para uma determinada exposição, a probabilidade de excedência de um limiar de intensidade de perigo numa zona costeira específica e pode ser realizado por qualquer perigo de tsunami (altura, profundidade de inundação, velocidade atual, etc.).

Os resultados da simulação determinística sem edificado para o cenário mais gravoso 2100 da NOAA, preveem uma área de inundação de 7.99 km² para a cidade de Lisboa, com uma extensão de inundação de 750 m em Belém, entre Alcântara e a Avenida de Ceuta, junto à ETAR, uma extensão de 2600 m, e na Baixa Pombalina uma extensão de inundação de 1200 m. Em termos de profundidade de inundação, as zonas de Alcântara e do Cais do Sodré são as mais afetadas com valores que ultrapassam os 10 m. A parte oriental de Lisboa é menos afetada podendo atingir até 3 m.

Os resultados da simulação determinística com edificado mostram uma menor extensão da inundação sendo a diferença devida por um lado ao efeito do edificado e por outro à inclusão de resistência de fundo.

Os resultados da avaliação probabilística mostram uma probabilidade de ocorrência de inundação relativamente baixa na maioria das zonas inundadas, menos de 15% para o cenário 2050. A diferença mais relevante entre os cenários 2050 e 2100, em termos de área inundada, ocorre na parte oriental da cidade de Lisboa entre o Braço de Prata e Sacavém onde para o cenário de 2050 a probabilidade de ocorrência de inundação por tsunami é nula. Os cenários de 2050 e 2100 diferem essencialmente na probabilidade de ocorrência de inundação. Para o cenário de 2050 a probabilidade máxima de inundação é registada na zona do Cais do Sodré com valores na ordem dos 30%. Nas restantes áreas

inundadas a probabilidade de inundação é baixa, sendo que entre o limite oeste da cidade de Lisboa e o Cais do Sodré não excede os 20%.

O âmbito territorial deste estudo inclui unicamente a faixa ribeirinha situada entre Algés - ocidente - e o Rio Trancão - oriente.

Os resultados aqui apresentados foram obtidos à luz do melhor conhecimento existente à data presente. No entanto existem limitações provenientes do conhecimento dos parâmetros da fonte sísmica da qualidade dos dados de base e / ou das limitações inerentes da simulação numérica.

Os resultados aqui apresentados constituem uma ferramenta de suporte para a Câmara Municipal de Lisboa na atualização do Plano Diretor Municipal e uma contribuição para a sua evolução e para o Planeamento de Emergência Municipal.

Por fim importa afirmar que os mapas de inundação apresentados deverão ser objeto de revisão:

- Se ocorrer um tsunami cujo impacto se verifica ter implicações para as zonas de inundação mostradas nos mapas apresentados;
- Se for identificada uma nova fonte de perigo - identificação de uma nova zona sísmica/tsunamigénica;
- A cada 5 a 10 anos, ou sempre que ocorra um desenvolvimento significativo nas tecnologias de simulação numérica;
- Se existirem dados batimétricos e topográficos de resolução e precisão melhoradas que justifiquem o cálculo de novos mapas de inundação.

2 Introdução

É conhecida a exposição da zona ribeirinha de Lisboa a inundações por tsunamis. A costa Portuguesa foi atingida no passado por tsunamis de origem sísmica. Estes eventos encontram-se descritos nos relatos históricos e no registo geológico. Os eventos mais destrutivos foram os tsunamis que se seguiram ao sismo de 26 de janeiro de 1531, 1 de novembro de 1755 e 31 de março de 1761. No século passado a rede maregráfica portuguesa registou tsunamis que se seguiram aos sismos de 25 de novembro de 1941, 28 de fevereiro de 1969 e 26 de maio de 1975. Destes três eventos o tsunami de 28 de fevereiro de 1969 atingiu a costa cerca das três da manhã e em situação de maré baixa o que levou a que os seus efeitos fossem pouco notados.

Estudos recentes revelam que a subida do Nível Médio do Mar (NMM) na costa portuguesa se dá, atualmente, a uma taxa superior a 3 mm/ano. É, portanto, relevante atualizar a caracterização e quantificação da exposição de Lisboa a inundações por tsunami, considerando cenários de aumento do NMM.

No âmbito da revisão do PDM para a cidade de Lisboa, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera, em colaboração com a Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e o Instituto Superior Técnico, realizou cartas de inundação por tsunami através do método determinístico - utilizando um cenário de referência de elevada magnitude - e do método probabilístico. Em ambos os casos foi considerada a subida do nível do mar devida a alterações climáticas. Foram igualmente contabilizados o efeito da maré, os efeitos meteorológicos de interação oceano-atmosfera e a influência do caudal no Rio Tejo.

Os resultados aqui apresentados referem-se unicamente a tsunamis originados por sismos.

3 Metodologia

A simulação da inundação por tsunami é o resultado da simulação numérica de um tsunami desde a zona de geração, propagação no oceano e inundação da zona costeira seca em condições normais. Os dados de entrada dos modelos podem variar consoante os modelos e a escala a que se aplicam. Para a geração e propagação oceânica são necessários um modelo digital de terreno e as condições iniciais: cenários credíveis de fontes de tsunamis locais e distantes para o litoral em perigo. Para expressar o impacto do tsunami em zonas costeiras, os modelos podem necessitar de informações mais detalhadas quanto à geometria e resistência do edificado, quanto à mobilidade de praias e estuários e quanto a eventuais condições de fronteira. As simulações aqui apresentadas seguem as linhas orientadoras do programa norte-americano National Tsunami Hazard Mitigation Program (<https://nws.weather.gov/nthmp/////////index.html>).

Como referido em 2. a avaliação da perigosidade e impacto de tsunamis foi feita utilizando duas metodologias diferentes: a aproximação determinista e a aproximação probabilística.

A aproximação determinista, ou aproximação baseada em cenários, utiliza eventos singulares para descrever a ameaça numa determinada zona. Os cenários utilizados são construídos a partir da informação disponível sobre os grandes eventos do passado e o cenário mais desfavorável de referência corresponde a um evento extremo mas credível para a zona de estudo.

A aproximação probabilística obriga ao conhecimento dos intervalos de recorrência dos eventos estudados numa determinada zona. A Avaliação Probabilística da Perigosidade de Tsunami (APPT ou em inglês Probabilistic Tsunami Hazard Assessment PTHA) simula a probabilidade de ocorrência de tsunamis de qualquer tamanho ao longo da costa portuguesa.

3.1 Modelação numérica da geração e propagação oceânica do tsunami

A propagação do tsunami no oceano aberto, desde a zona de geração até a zona próxima da costa, foi calculada utilizando um modelo numérico de diferenças finitas que resolve numericamente as equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível, na aproximação das águas pouco profundas (shallow-water equations). Neste trabalho utilizou-se o código NSWING, baseado no modelo COMCOT da Universidade de Cornell (Liu et al., 1998). O código resolve as equações de Navier Stokes na aproximação das águas pouco profundas na opção linear (LSW - Linear Shallow Water) ou não linear (NLSW - Non Linear Shallow Water) em oceano aberto. Para o cálculo do espraiamento (run-up), da máxima distância de inundação, da área inundada e velocidades do fluxo em terra é sempre utilizada a versão não linear (NLSW).

O modelo numérico utiliza como dados de entrada a deslocação inicial da superfície livre do oceano e o modelo digital de elevação.

A deslocação inicial da superfície livre do oceano foi obtida calculando a perturbação do fundo do oceano que é determinada a partir do modelo de deslocação constante num semi-espaço elástico homogéneo. Admitiu-se também que a perturbação inicial da superfície do oceano reproduz a deformação elástica do fundo. O cálculo da deslocação inicial da superfície livre para o pior cenário possível foi feito utilizando os parâmetros de rutura da fonte sísmica, no caso determinístico, e usando os parâmetros da tabela apresentada no Anexo B para o caso probabilístico.

3.2 Método determinístico de cálculo da perigosidade de tsunami

3.2.1 Método determinístico sem edificado

A abordagem determinística, ou avaliação baseada em cenários, utiliza o cenário de referência (cenário máximo credível ou cenário mais gravoso) para calcular o impacto subsequente do tsunami nas áreas costeiras de interesse. Esta abordagem inclui três etapas:

1) *Seleção do cenário de referência*

A seleção do cenário de referência foi realizada tendo como ponto de partida o sismo de 1 de novembro de 1755, sendo consideradas como variáveis adicionais a sua localização possível e o mecanismo focal. Esta parametrização inclui os efeitos do aumento máximo do nível médio do mar e do estágio extremo da maré que podem ocorrer ao longo da zona costeira de interesse.

2) *Modelação da geração do tsunami - deslocamento da superfície livre do oceano quando ocorre o sismo*

Para cada fonte sísmica selecionada na etapa 1, a geração do tsunami foi calculada usando a aproximação do semi-espaço elástico homogéneo (Okada 1985) que permite calcular a deformação sísmica do fundo do mar após um terremoto. Esta deformação será transferida para a superfície do mar assumindo que a água é incompressível e que o sismo é instantâneo.

3) *Simulação da propagação do tsunami e da inundação costeira*

Nas simulações numéricas da propagação e inundação do tsunami foi utilizado o software NSWING (Miranda et al., 2014) que resolve as equações de Navier Stokes na aproximação das águas pouco profundas, com 4 níveis de “nesting”, de forma a assegurar uma resolução espacial de 10m na zona próxima da costa e na propagação do tsunami em terra. A incorporação do efeito correspondente ao aumento do nível médio do mar e aos efeitos de variações das marés nos cálculos de inundação por tsunami foi realizada utilizando modelos digitais de terreno de alta resolução que incorporam essas informações.

3.2.2 Método determinístico com edificado

A simulação numérica de alta resolução espacial cuja metodologia se detalha nesta seção visa determinar a perigosidade de um tsunami correspondente ao cenário sísmico e de tsunami de referência – o tsunami de 1755 (ver secção 3.2.1) – considerando a geometria do edificado de Lisboa de 2018 e cenários probabilísticos de subida do NMM¹. O domínio de simulação engloba todo o estuário do Rio Tejo mas a interpretação dos resultados restringe-se à zona ribeirinha de Lisboa².

¹ Os cenários de probabilidade a considerar são os constantes em Antunes et al 2017.

² Por “zona ribeirinha de Lisboa” entende-se a faixa em contacto com o estuário do Tejo entre Algés e o Rio Trancão, até à cota 15 m acima do nível de preia mar de águas vivas aceite para 2017.

Trata-se de simulações determinísticas, para vários cenários de elevação do nível do mar, em que a malha de cálculo se ajusta ao edificado e permite resolver o escoamento no espaço entre edifícios. Recorre-se a simulação numérica de alta resolução³ cujo elevado detalhe hidrodinâmico permite contextualizar o papel do edificado, nomeadamente a influência da cércea e orientação dos edifícios, na propagação da inundação. A perigosidade do tsunami   calculada com base no método exposto em Conde et al. (2015). A  rea máxima das células de cáculo   de 2.0 m² (triângulos com lados de comprimento médio de 2.0 m) na zona ribeirinha de Lisboa (definida na nota 3), por forma a resolver o escoamento em todos os elementos urbanos (avenidas, ruas, largos, praças, becos, arcos, entre outros elementos) potencialmente inundáveis.

Esta simula o, necessariamente de alta resolu o espacial, será, doravante, designada por *simula o determinística com edificado*.

Identificam-se, de seguida, as etapas inerentes a esta simula o.

- 1) *Recolha de informa o geométrica (topografia e planimetria)*
 - 1.1 Topografia da zona ribeirinha de Lisboa e batimetria do estuário do Tejo e zona Oceânica adjacente
 - 1.2 Geometria do edificado (planimetria) da zona ribeirinha de Lisboa
 - 1.3 Articula o dos modelos de eleva o de 1.1 com a geometria obtida em 1.2 num modelo digital de superfície
 - 1.4 Características de rugosidade do fundo e da mobilidade dos sedimentos do fundo (se aplicável).
- 2) *Recolha de informa o geofísica – cenários de níveis do mar e estuário do Tejo*
- 3) *Formula o dos níveis e velocidades do tsunami no oceano Atlântico entre Cascais e a Costa da Caparica.*
- 4) *Determina o da malha de cáculo e identifica o das fronteiras abertas do domínio de cáculo.*
- 5) *Atribui o de valores de variáveis (alturas do escoamento, velocidades) e parâmetros (características de geometria, rugosidade e mobilidade do fundo, etc.) relevantes para especificar o instante inicial de cáculo.*
- 6) *Simula o matemática para os vários cenários de nível do mar com o modelo HiSTAV.*
- 7) *C culo do mapa de perigosidade por combina o dos valores de altura da inunda o e velocidade.*

³ Por modela o matemática de alta resolu o entende-se aplica o de modelos bidimensionais não lineares (onda dinâmica completa) resolvidos numericamente por intermédio de discretiza es de volumes finitos adaptáveis a fronteiras sólidas. Os edifícios devem ser representados por condi es de fronteira internas, i.e. zonas sem escoamento, se a cota do seu topo for superior a 9 m, ou devem ser representados por eleva es do terreno, nos restantes casos.

Os passos 1), 2) e 5) correspondem à formulação das condições iniciais para a modelação hidrodinâmica. O passo 3) corresponde à formulação das condições de fronteira. No passo 4) procede-se à implementação numérica destas formulações. O passo 5) corresponde ao cálculo numérico, realizada no servidor de cálculo do grupo de investigação do CERIS, e o passo 6) à contextualização dos resultados desse cálculo.

3.3 Método probabilístico de cálculo da perigosidade de tsunami

O método de probabilístico de avaliação de perigosidade de Tsunami, em função do tempo, e para uma determinada exposição, a probabilidade de excedência de um limiar de intensidade de perigo numa zona costeira específico (Geist & Parsons 2006). Os resultados são apresentados sob a forma de altura de onda, profundidade de inundação e velocidade da água na zona inundada. Este método apresenta como vantagem relativamente aos métodos determinísticos o fato de permitir na avaliação a ocorrência de eventos pequenos e de eventos de magnitude extrema. Permite ainda incorporar o de tratamento das diferentes fontes de incerteza na avaliação da perigosidade de tsunami.

Os resultados aqui apresentados utilizam a abordagem estocástica de árvore de eventos (Omira et al., 2016), que integra modelos de probabilidade de fonte sísmica, modelação numérica de tsunami de alta resolução e métodos estatísticos para derivar a probabilidade de ocorrência de tsunami e de excedência da inundação do tsunami para dadas exposições. O método inclui ainda o tratamento estatístico das incertezas relacionadas com a origem do tsunami, do nível do mar e da maré, incluindo efeitos meteorológicos. As etapas deste método de avaliação são as seguintes:

1) Determinação de eventos possíveis e suas taxas de recorrência

Definição das fontes ou zonas sísmicas potencialmente tsunamigénicas; Definição das magnitudes dos sismos individuais capazes de gerar tsunamis dentro de cada zona de fonte (zona tsunamigénica); Cálculo da frequência anual de ocorrência para eventos de magnitudes individuais usando modelos de probabilidade para as fontes seguido de realizações do evento que levem em conta a incerteza sobre a localização de fontes (dentro da zona de origem e a falha) e na distribuição de deslizamento ao longo do plano de falha.

2) Simulação numérica da inundação integrando as incertezas de nível do mar e maré

Tal como no ponto 3.1 utilizou-se o código NSWING considerando diferentes cenários meteorológico-oceanográficos. Os cenários de nível do mar incorporam todas as componentes meteorológicas. A incorporação das incertezas sobre o nível do mar e maré foi feita utilizando método apresentado em Omira et al. (2016).

3) Cálculo probabilístico da inundação

Para tempos de exposição diferentes, foram calculados mapas de inundação probabilística do tsunami de alta resolução usando a metodologia estatística descrita em Geist & Parsons (2006), González et al. (2009, 2013) e Omira et al. (2016).

4 Informação de Base

4.1 Modelo Digital do Terreno

O MDT utilizado pelo IPMA e o IST no âmbito deste estudo foi produzido pelo Instituto Dom Luiz em 2016 para a Câmara Municipal de Lisboa (CML), compreendendo 287817 pontos cotados com os quais se produziu uma grelha raster (Fig. 1). O modelo tem uma resolução espacial de 1 metro, foi validado e retificado em marcas de nivelamento geométrico da Direção-Geral do Território (DGT) e da Administração do Porto de Lisboa (APL). O modelo apresenta uma precisão superior a 20 cm e uma exatidão superior a 5 cm na zona ribeirinha, com confiança a 95%. Foi calibrado com Datum Vertical associado ao modelo de maré e ao NMM de Cascais (1938).

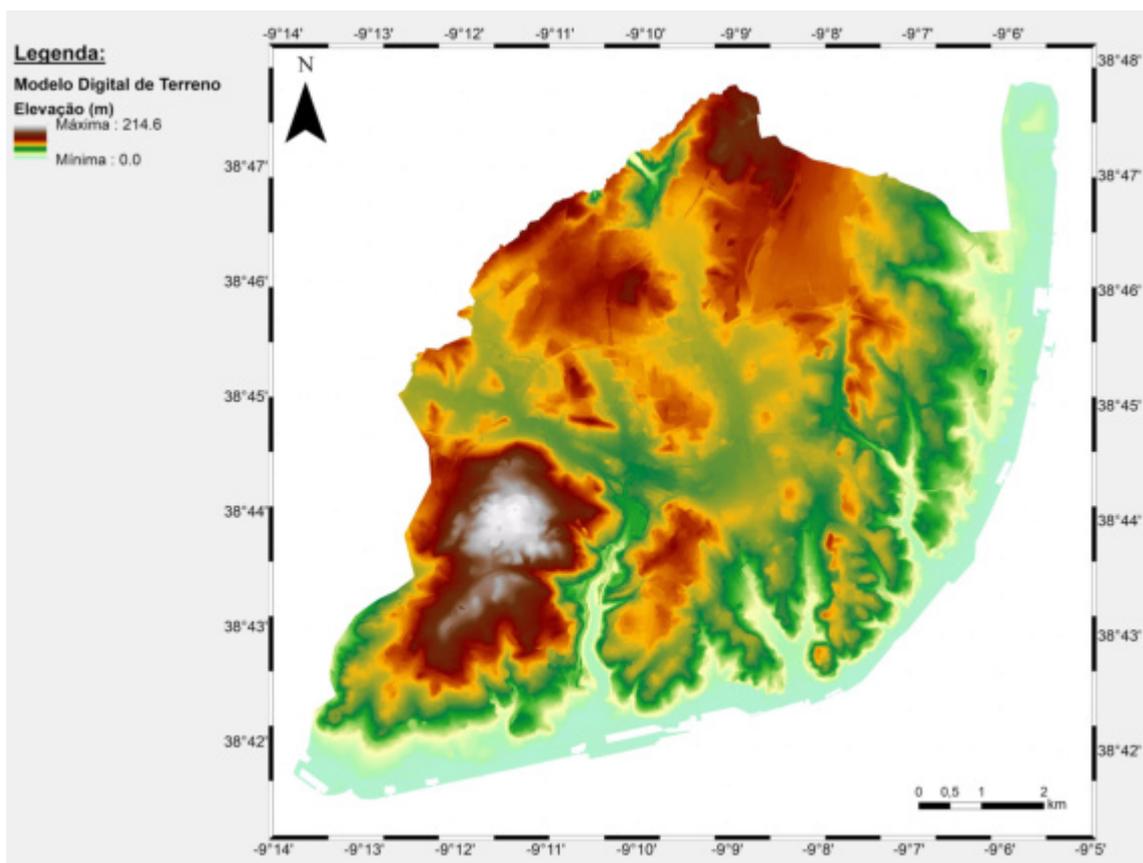


Figura 1 - Modelo Digital de Terreno de Lisboa, calibrado e validado em marcas de nivelamento.

4.2 Modelo digital de superfície para a simulação com edificado

Para a construção de um modelo digital de superfície (MDS) detalhado, procedeu-se à sobreposição do MDT (secção 4.1) e da rasterização da informação vectorial correspondente ao edificado.

A informação quanto ao edificado traduz a planimetria da cidade de Lisboa, que corresponde ao cadastro geográfico em planta do edificado fornecido pelo SMPC (Serviço Municipal de Protecção Civil) para o ano de 2017, e a volumetria dos edifícios, para a qual foi usado o valor estimado para a cota máxima de cada edifício, inferida através do número de pisos registado na tabela de atributos e do valor médio do terreno circunscrito pelo perímetro construído de cada edifício. O modelo digital de superfície resultante pode ser observado na figura 2.

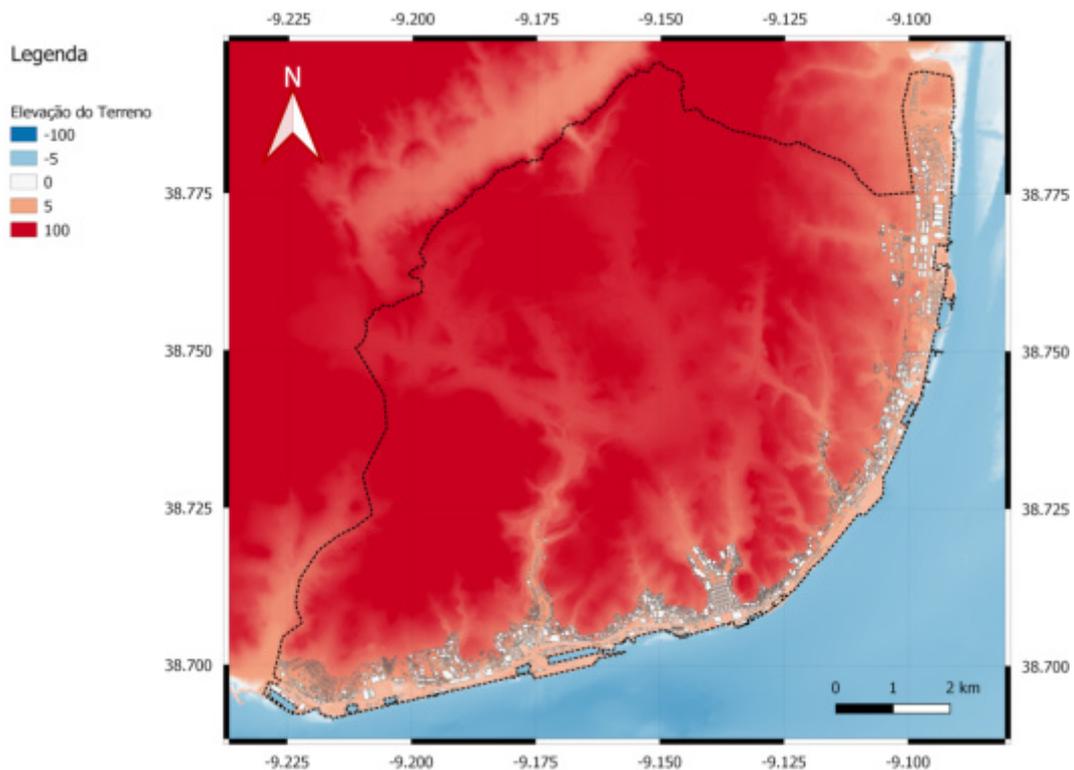


Figura 2 - Modelo Digital de Superfície.

A figura 3 mostra, em pormenor, o detalhe geométrico que é possível implementar através da malha de cálculo não estruturadas, tirando partido de informação geográfica de alta resolução.

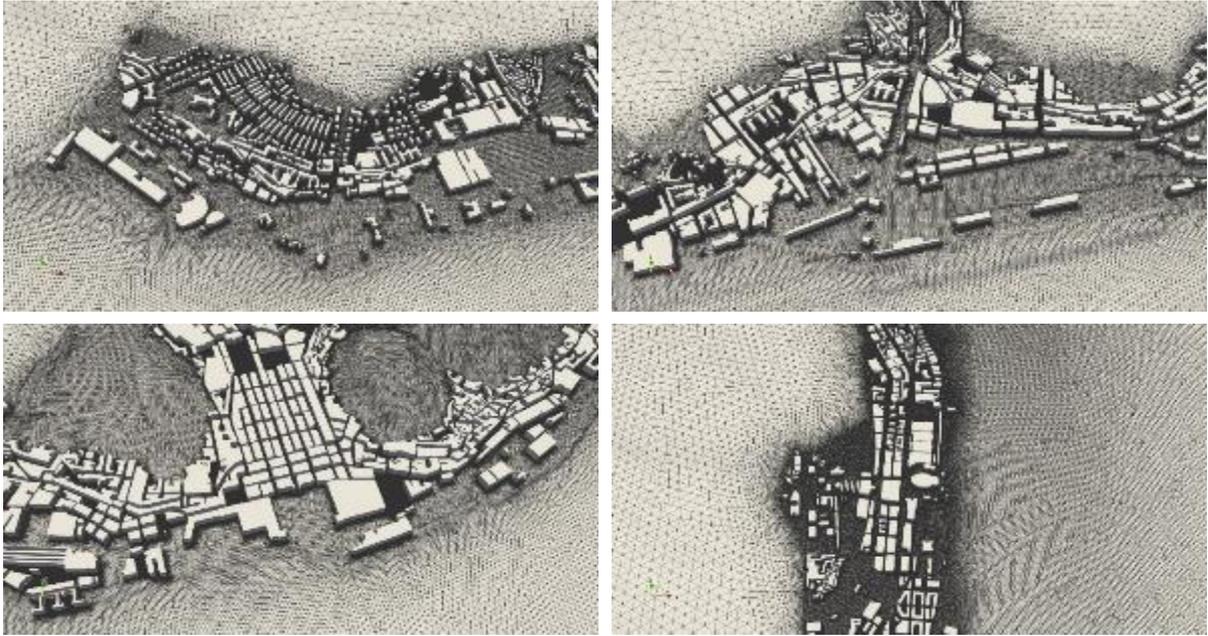


Figura 3 - Detalhe da discretização do Modelo Digital de Superfície para Algés e Belém (superior esquerdo), Alcântara (superior direito), Baixa Pombalina (inferior esquerdo) e Parque das Nações (inferior direito).

Nas simulações realizadas, considerou-se que a superfície do terreno é fixa, desprezando-se a mobilidade do leito do rio e praia na zona de Algés. Considerou-se ainda que a rugosidade da superfície pode ser expressa um coeficiente da fórmula de Manning-Strickler de $70 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, valor consistente com o proposto em Park et al. (2013) no contexto da validação de ferramentas de simulação do impacto de tsunamis em malhas urbanas.

4.3 Modelos do nível do mar

4.3.1 Projeções de Nível do Mar para 2050 e 2100

As superfícies de referência hidrostática de maré, elaboradas para o Estuário do Tejo, são baseadas na concordância de maré de um conjunto de pontos ao longo do Estuário, as quais traduzem o desfasamento ou a geometria da superfície de maré em relação à maré do Porto de Lisboa.

Para o Estuário do Tejo, cenários 2050 e 2100, foram produzidas um total de 12 superfícies hidrostáticas de maré, de acordo com os cenários de perigosidade intermédia e extrema de subida do nível médio do mar, modelo Mod.FC_2 (Antunes et al., 2017) e modelo NOAA (Extreme), respetivamente (ver tabela 1).

Estas superfícies são alusivas a 3 níveis de maré, Preia-mar máxima com sobrelevação meteorológica (PMmax+SM), Preia-mar de Águas-Vivas (PMAV) e Baixa-mar de Águas-Vivas (BMAV).

Tabela 1 - Tabela de valores de projeção dos vários níveis de marés, usados na elaboração das superfícies hidrostáticas de maré (valores sombreados). Em cima, cenário de nível médio do mar de perigosidade intermédia com o modelo Mod.FC_2. EM baixo, cenário de nível médio do mar de perigosidade extrema com o modelo NOAA (Extreme).

Modelo Mof.FC_2									
	PMmax	PMmax+SM	PMav	PMmed	PMmed+SM	NMM	BMmed	BMav	BMmin
2050	2.58	3.18	2.05	1.68	2.28	0.44	-0.94	-1.17	-1.70
2100	3.28	3.88	2.75	2.38	2.98	1.14	-0.23	-0.47	-1.00

Modelo NOAA_Extreme									
	PMmax	PMmax+SM	PMav	PMmed	PMmed+SM	NMM	BMmed	BMav	BMmin
2050	2.94	3.54	2.40	2.04	2.64	0.80	-0.58	-0.81	-1.34
2100	4.74	5.34	4.21	3.84	4.44	2.60	1.23	0.99	0.46

4.3.2 Modelo do nível do mar para a simulação determinística sem edificado

A figura 4 apresenta a condição inicial do nível do mar considerada para a simulação determinística sem edificado. Esta condição referente ao cenário mais gravoso 2100 da NOAA, prevê a subida do nível do mar até à cota 4.5m em grande parte da cidade de Lisboa, sendo a zona oriental a partir do Parque das Nações menos afetada.

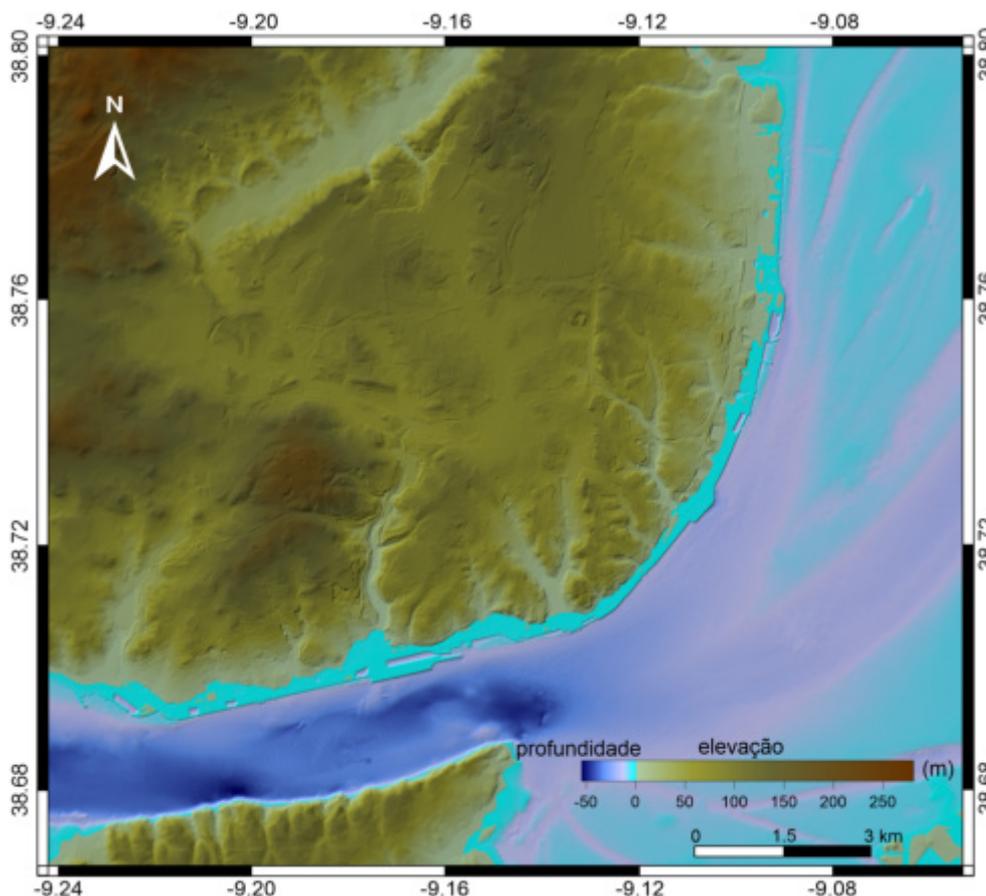


Figura 4 - Nível máximo do mar para o cenário de Extremo do NMM (NOAA) em 2100.

4.3.3 Modelo do nível do mar para a simulação determinística com edificado

Os cenários de níveis do mar correspondem aos níveis de maré previstos para as condições de Baixa-Mar, Preia-Mar e Preia-Mar com sobrelevação meteorológica, para os anos de 2050 e 2100 através das metodologias NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e Modelos de Projecção do Nível Médio do Mar da FCUL (Mod.FC) de acordo com Antunes et al. (2017).



Figura 5 - Níveis de superfície livre do Estuários em Preia-Mar (esquerda) e Baixa-Mar (direita) (mínimo: verde – máximo: vermelho), conforme tabela 2).

A figura 5 representa a estrutura da distribuição níveis da superfície livre no estuário do Rio Tejo. Note-se que, estruturalmente, existem apenas duas distribuição de níveis – para Preia-Mar e para Baixa-Mar. Os níveis máximo e mínimo concretos que definem as distribuições particulares de níveis para cada cenário são os que se identificam, em metros, na Tabela 2.

Os valores de níveis (em metro) são referidos ao Datum Altimétrico de Cascais 1938.

Tabela 2 - Valores máximos e mínimos dos níveis no domínio de cálculo das simulações de alta resolução espacial.

CENÁRIO	NÍVEL MÍNIMO	NÍVEL MÁXIMO
NOAA2100_PMMAXSM	4.98	5.84
NOAA2100_PMAV	3.85	4.71
NOAA2100_BMAV	0.85	1.07
NOAA2050_PMMAXSM	2.18	3.04
NOAA2050_PMAV	2.04	2.90
NOAA2050_BMAV	-0.95	-0.73
ModFc2100_PMMAXSM	3.52	4.38
ModFc2100_PMAV	2.39	3.25
ModFc2100_BMAV	-0.61	-0.39
ModFc2050_PMMAXSM	2.82	3.68
ModFc2050_PMAV	1.69	2.55
ModFc2050_BMAV	-1.31	-1.09

4.3.4 Modelo do nível do mar para a simulação probabilística

É reconhecido que o nível do mar pode controlar significativamente o impacto e a inundação quando um tsunami atinge as áreas costeiras (Myers & Baptista, 2001; Dao & Tkalich, 2007). Como é difícil de prever o nível do mar no momento da ocorrência de um tsunami, este é considerado como uma fonte de incerteza no cálculo probabilístico da perigosidade. Para a inclusão desta incerteza no cálculo probabilístico da perigosidade do tsunami foi calculada a probabilidade de que o impacto de tsunami, expresso em altura da onda ou profundidade de inundação, exceda um determinado limiar para um cenário de tsunami que inclua um nível de mar específico. Se η_i é o limiar que deve ser ultrapassado por uma altura de onda ou uma profundidade de inundação η , para encontrar a probabilidade de que η exceda η_i é necessário calcular a probabilidade de exceder um nível do mar que ao interagir com o evento de tsunami, resulte na excedência η_i por η .

Esta probabilidade de exceder o nível do mar é determinada a partir das curvas da probabilidade cumulativa de excedência tomando em conta os vários efeitos da subida de nível de mar (maré, efeitos meteorológicos, subida do nível médio do mar). Para os cenários de 2050 e 2100, a figura 6 representa a probabilidade cumulativa de excedência de nível de mar na área de estudo que foi considerada na avaliação probabilística da perigosidade de tsunami.

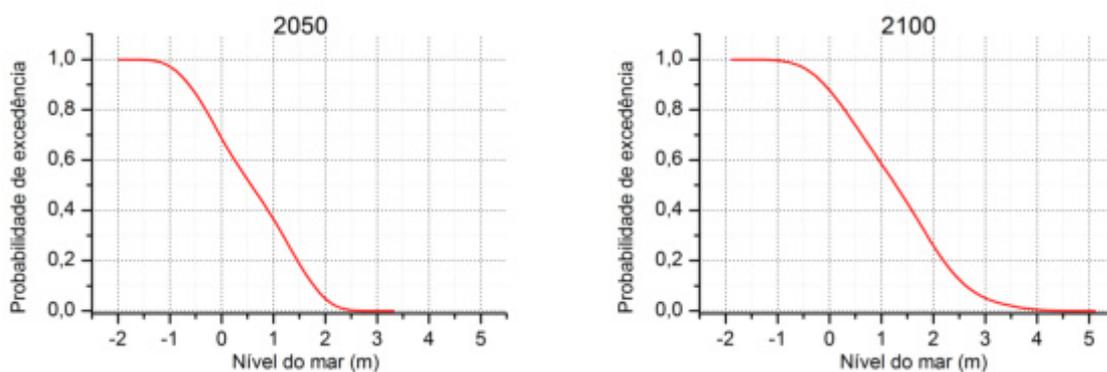


Figura 6 - Probabilidade cumulativa de excedência de níveis do mar para os cenários de 2050 e 2100.

4.4 Fontes Tsunamigénicas

4.4.1 Regiões

Neste estudo, abordamos exclusivamente a perigosidade dos tsunamis gerados por sismos. Estão identificadas três grandes zonas capazes de gerar tsunamis com potencial de afetar a costa Portuguesa. São estas, o Sudoeste da Margem Ibérica (SWIM), a zona da falha da Glória (GF), e a zona do Arco das Caraíbas (ver figura no Anexo B).

Historicamente, a maioria dos grandes tsunamis que impactaram o Atlântico NE foram gerados por sismos localizados na área do SWIM (ver Fig. 7). Nesta área, está identificado um sistema de falhas ativas que incluem a falha da Ferradura, Marquês de Pombal, Planície Abissal do Tejo, Banco Gorringe (Johnston, 1996; Zitellini et al., 2009; Omira et al., 2009; Rosas et al., 2012; Matias et al., 2013), e a falha de Cádiz (Gutscher et al., 2002; Duarte et al., 2013). Além disso, a região do SWIM foi, em tempos históricos, afetada por diversos eventos (Baptista & Miranda 2009; Kaabouben et al., 2009), e mais recentemente, por pequenos tsunamis que marcaram o século XX (Baptista & Miranda, 2009). O tsunami resultante do sismo de 1 Novembro de 1755 foi provavelmente o evento mais devastador na história do Atlântico NE em termos de perda de vidas e destruição. No entanto, este não foi o único grande tsunami na região SWIM.

A segunda área tsunamigénica de interesse é a zona da falha Glória (ver Fig. B1 do Anexo B). A falha de Glória é um segmento no limite da placa Eurásia-Núbia. É uma falha que, localizada entre 24W e 19W que apresenta escassa atividade sísmica (Argus et al., 1989; Buforn et al., 2004). Contudo, durante o século XX ocorreram, nesta zona, três eventos de magnitude superior a 7.5, em particular o sismo de 25 de Novembro de 1941, com magnitude entre 8.3 a 8.4, e o sismo de 26 de maio de 1975 com magnitude 7.9. Os tsunamis gerados foram registados nos marégrafos dos Açores, Madeira, Portugal Continental, Espanha e Reino Unido (Baptista et al., 2011). Em 1941, verificou-se o galgamento de praias na zona da Foz do Douro (Baptista & Miranda 2009).

As Caraíbas é a terceira zona tsunamigénica considerada neste estudo. Esta região é caracterizada por atividade sísmica relativamente alta. Alguns dos eventos sísmicos ocorridos geraram tsunamis com impacto destrutivo na zona das Caraíbas (Harbitz et al., 2012). O estudo de Lander et al. (2002) relata a ocorrência de mais de 50 tsunamis desde o ano de 1530. Nas Caraíbas, a Fossa de Porto Rico com 800 km de comprimento, está localizada na fronteira entre o Mar das Caraíbas e o Oceano Atlântico. Em 1918 um evento de magnitude 7.5 originou um tsunami com ondas entre 4 e 6 m, resultando na morte de 40 pessoas na costa noroeste de Porto Rico (Mercado & McCann, 1998). Neste estudo, assumimos que possíveis tsunamis desencadeados ao longo do Fossa de Porto Rico podem atingir as costas da região do Atlântico NE.

4.4.2 Base de dados de cenários tsunamigénicos determinísticos e probabilísticos

Na abordagem determinística consideram-se, para cada zona tsunamigénica, os cenários mais credíveis, dentro dos quais foi selecionado o cenário mais gravoso que corresponde a um evento com magnitude Mw 8.75. Este consiste na rotura de duas falhas: Marquês de Pombal (MPF) e Ferradura

(HSF) (Fig. 7). A tabela 3 apresenta os parâmetros das falhas usados para a modelação da geração de tsunami.

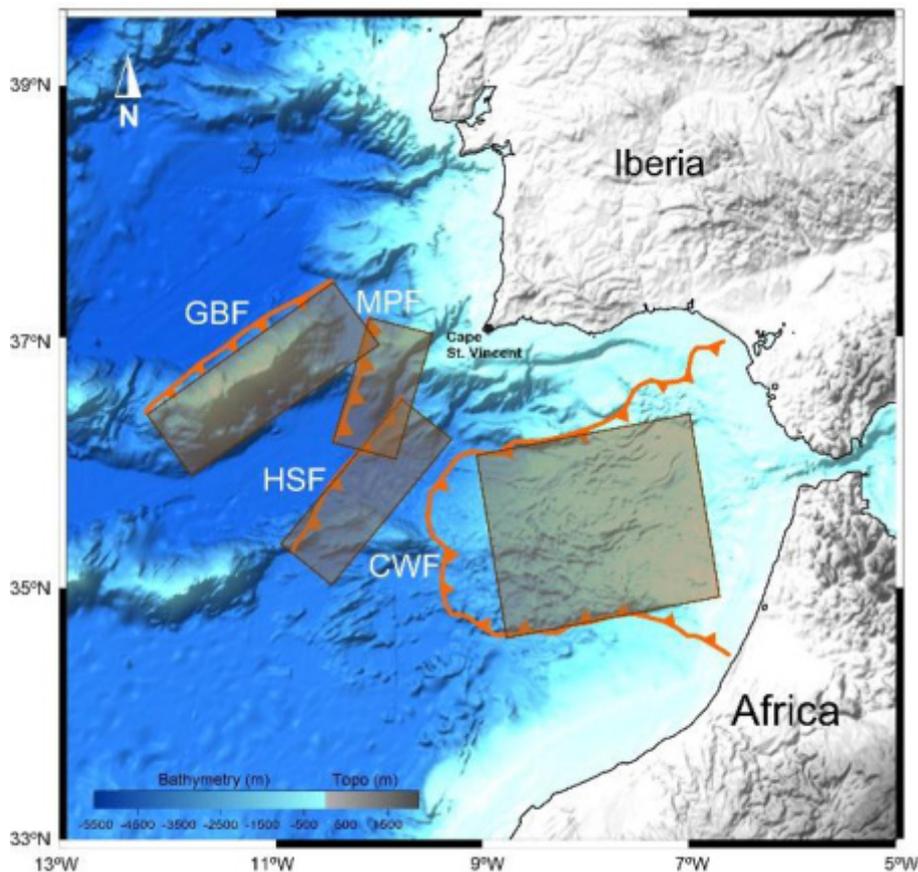


Figura 7 - Fontes tsunamigénicas na área do SWIM.

Tabela 3 - Parâmetros das falhas da Ferradura (HSF) e do Marquês de Pombal (MPF).

M _w	Cenário	Limites dos segmentos das falhas	L x W (km)	Dip (°)	Slip (m)	Rake (°)	Depth to the top (km)	mu (e+10 Pa)
8.75	HSF e MPF	MPF: -10.424 36.184 -10.018 37.117	120x80	35	12	90	5	4.5
		HSF: -10.989 35.384 -9.685 36.542	175x100		14			

Para a abordagem probabilística, considera-se um grande número de cenários possíveis. Assim, considerando as três regiões tsunamigénicas identificadas, são utilizadas as seguintes etapas para definir a base de dados de cenários para o estudo APPT: (1) seleção de intervalos de magnitude, (2) definição de falhas típicas (FT), e (3) flutuação das FT ao longo do traço da falha na região de origem. A base de dados de cenários APPT é então construída considerando magnitudes que variam entre Mw 8.0 - 9.0, aplicando um intervalo regular de 0.25. Para cada intervalo de magnitudes, associamos uma

falha típica (F que é definida usando uma lei de escala apropriada para cada zona fonte, com o fim de definir os parâmetros da falha necessários para a modelação de tsunamis (geometria de falha, dip, slip, rake). A FT, com um intervalo regular (metade do comprimento da falha), varia ao longo do eixo da falha considerada, obtendo-se assim um número máximo de cenários possíveis. Esta base de dados de cenários encontra-se no anexo B deste relatório.

4.4.3 Taxa de recorrência

A taxa anual de recorrência de cada intervalo de magnitude é avaliada através do método Bayesiano que incorpora informação sísmica de catálogos históricos e instrumentais para cada zona fonte.

Para calcular as taxas de recorrência para as zonas do SWIM e das Caraíbas (ver anexo C) foi utilizada a Lei de Gutenberg–Richter (G-R) juntamente com uma aplicação desenvolvida por Kijko (2004). Alternativamente, para a zona da falha da Glória, utilizou-se uma abordagem semi-empírica, ajustando uma lei de escala à zona de fratura típica (Wells & Coppersmith 1994) ao longo da falha da Glória (~4 mm /ano, Fernandes et al., 2003). Os resultados destes modelos foram apresentados em Omira et al. (2015) para as três zonas tsunamigénicas consideradas, nomeadamente a zona do SWIM, da Glória e das Caraíbas. As taxas de recorrência para cada zona encontram-se no anexo C.

5 Resultados

5.1 Cartografia da inundação por tsunami – Método Determinístico

5.1.1 Simulação determinística sem edificado

Nesta secção apresentamos os mapas de inundação da zona de Lisboa resultante do cenário de referência (secção 3.2.1), considerando as projeções do nível do mar para 2050 (Fig. 8 e Fig. 9) e para 2100 (Fig. 10 e Fig. 11), correspondentes aos cenários NOAA2050_PMmaxSM e NOAA2100_PMmaxSM (ver tabela 2). Estes resultados foram obtidos pelo método determinístico considerando um tsunami causado por um sismo de magnitude Mw8.75 e um modelo digital do terreno da cidade de Lisboa com resolução espacial de 10 m e sem edificado. Este modelo foi construído através da combinação de dados topográficos (MDT produzido pelo Instituto Dom Luiz com uma resolução espacial de 1 m, secção 4.1) e batimétricos (batimetria do Tejo disponível com uma resolução espacial de 10 m, Baptista et al., 2011)

A figura 8 apresenta a área inundada resultante do impacto combinado de tsunami com a subida do nível do mar para 2050. Nesta figura podemos observar que para o cenário de 2050 uma parte considerável da zona ribeirinha da cidade de Lisboa é inundada, e estima-se que uma área com cerca de 6.06 km² seja submersa devido ao efeito combinado de tsunami e da subida do nível do mar. Os

resultados mostram um impacto significativo em termos da extensão da inundação. No limite ocidental da cidade de Lisboa a extensão da inundação pode chegar aos 680 m. Entre Alcântara e a Avenida de Ceuta, junto   ETAR, estima-se uma extensão de inundação na ordem dos 2250 m, e na zona da Baixa Pombalina prevê-se uma extensão que pode alcançar 1100 m.

A figura 9 apresenta o mapa de inundação da cidade de Lisboa em termos das profundidades calculadas considerando o impacto combinado de tsunami com a subida do nível do mar para 2050. A análise desta figura indica que para a cidade de Lisboa as maiores profundidades de inundação verificam-se maioritariamente entre o limite ocidental da cidade de Lisboa e o Terreiro do Paço com valores que variam entre os 5 m e os 12 m nas zonas ribeirinhas. A zona de Alfama atinge valores máximos na ordem dos 5 m. A parte oriental de Lisboa   menos afetada em termos de profundidade de inundação, atingindo valores na ordem dos 2 m na zona da Expo.

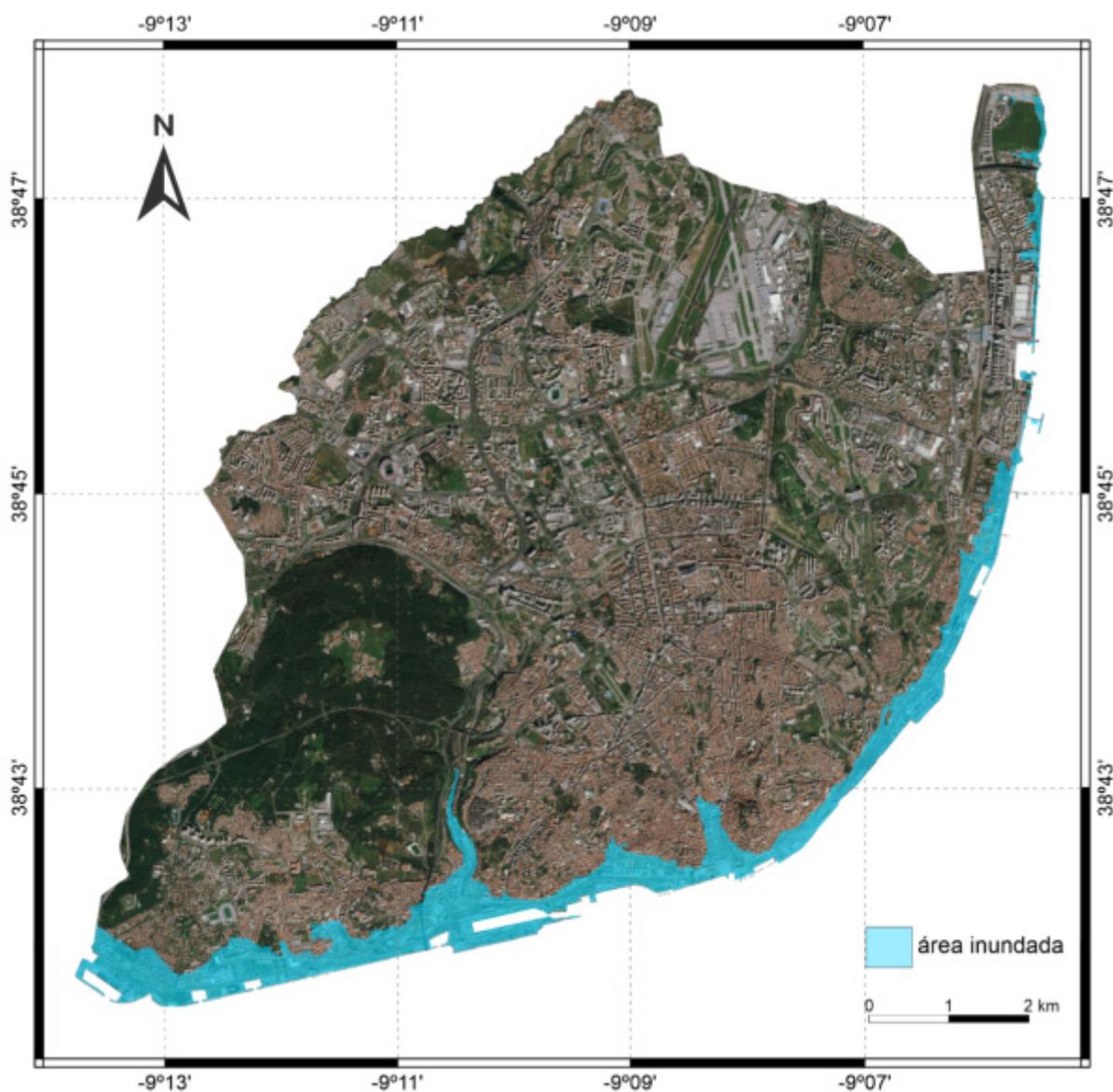


Figura 8 -  rea de inundação na zona de Lisboa para o cenário 2050.

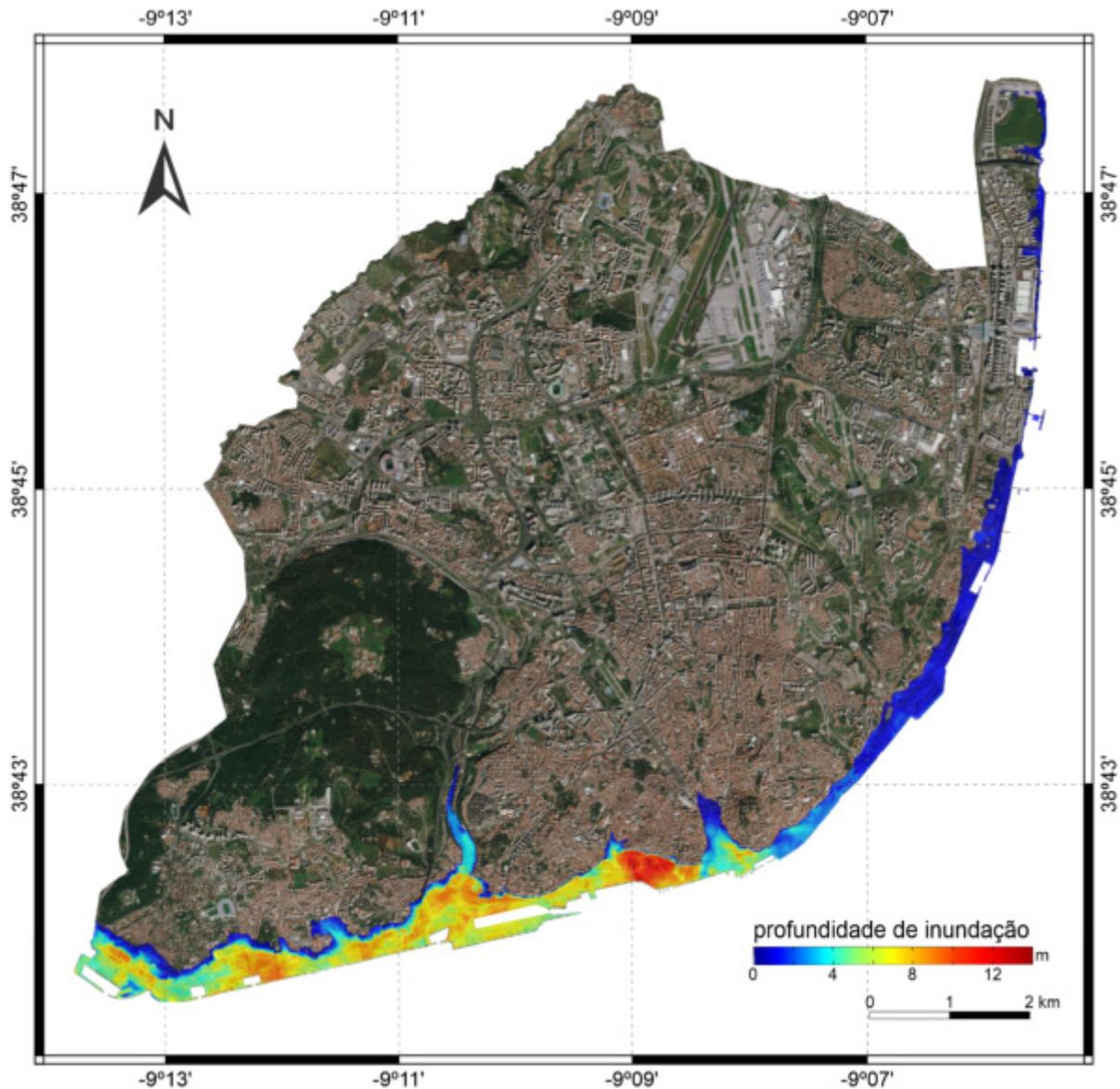


Figura 9 - Profundidade de inundação da zona de Lisboa para o cenário 2050.

Para o cenário de 2100, apresentamos os resultados da inundação nas figuras 10 e 11. A figura 10 mostra a área de inundação simulada considerando o impacto combinado de tsunami e da subida do nível do mar para 2100. Como esperado, este cenário produz mais inundação do que o cenário de 2050. O impacto combinado de tsunami com a subida do nível do mar resulta na inundação de cerca de 7.99 km² da cidade de Lisboa. As zonas mais afetadas, à semelhança com o cenário de 2050, encontram-se entre o limite ocidental da cidade de Lisboa e o Terreiro do Paço. Em particular, verifica-se em Belém uma extensão de inundação de 750 m, entre Alcântara e a Avenida de Ceuta, junto à ETAR, uma extensão de 2600 m, e na Baixa Pombalina uma extensão de inundação de 1200 m. Para o cenário de 2100, a zona da Expo mostra mais área inundada quando comparada ao cenário de 2050, apresentando em algumas zonas uma extensão de inundação na ordem dos 500 m. Tal deve-se maioritariamente ao efeito da subida do nível do mar e não ao impacto de tsunami.

Na figura 11 apresentamos o mapa da inundação para o cenário de 2100 em termos de profundidades de inundação. A análise deste mapa mostra que para a cidade de Lisboa as maiores profundidades de inundação encontram-se nas zonas ribeirinhas desde o limite ocidental da cidade   Baixa Pombalina, com destaque para as zonas de Belém, Alcântara-Mar e o Cais do Sodré, que apresentam valores a variar entre os 8 m e os 13 m. A profundidade de inundação resultante do impacto combinado decaiu a partir da zona de Alfama até   parte oriental de Lisboa, estimando-se valores não superiores a 2.5 m na zona da Expo.

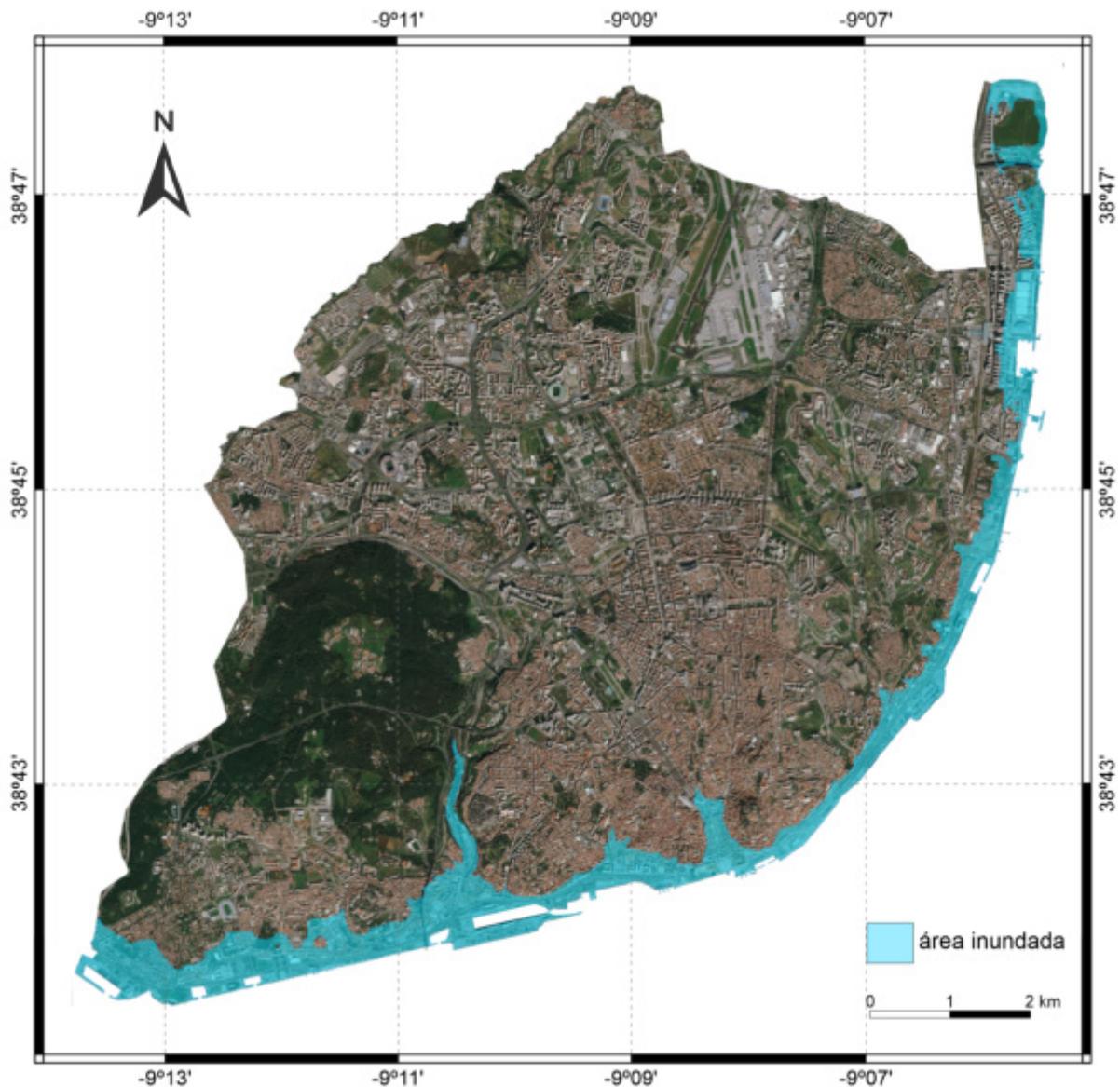


Figura 10 -  rea de inundação na zona de Lisboa para o cenário 2100.

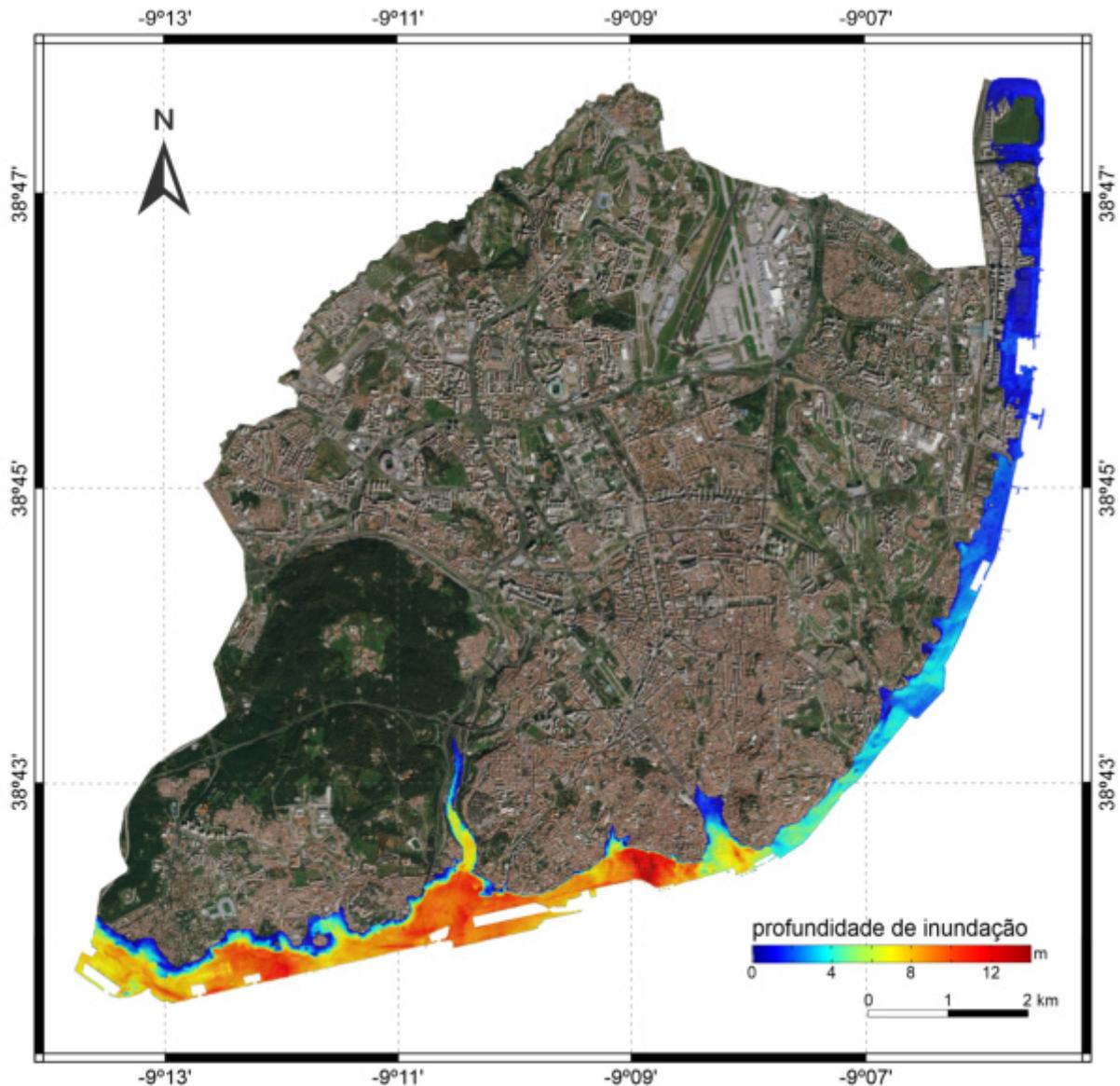


Figura 11 - Profundidade de inundação da zona de Lisboa para o cenário 2100.

5.1.2 Simulação determinística com edificado

Nesta secção apresentam-se os resultados da simulação de alta resolução espacial com edificado. Na figura 12 apresenta-se a extensão da inundação para o cenário NOAA2100_PMmaxSM, correspondente ao cenário de referência de tsunami combinado com a projecção de preia mar de águas vivas máxima e sobre-elevação meteorológica para 2100 (ver Tabela 2). Na figura representa-se também o limite da inundação associada à maré (linha vermelha). Os resultados para o cenário NOAA2050_PMmaxSM, correspondente ao cenário de referência de tsunami combinado com a projecção de preia mar de águas vivas máxima e sobre-elevação meteorológica para 2050, podem ser consultados no Anexo A2.2.

Em relação aos resultados apresentados na secção 5.1.1, verifica-se que é menor a extensão da inundação obtida com esta abordagem de modelação matemática. A diferença deve-se à inclusão de resistência de fundo e, sobretudo, ao efeito do edificado.

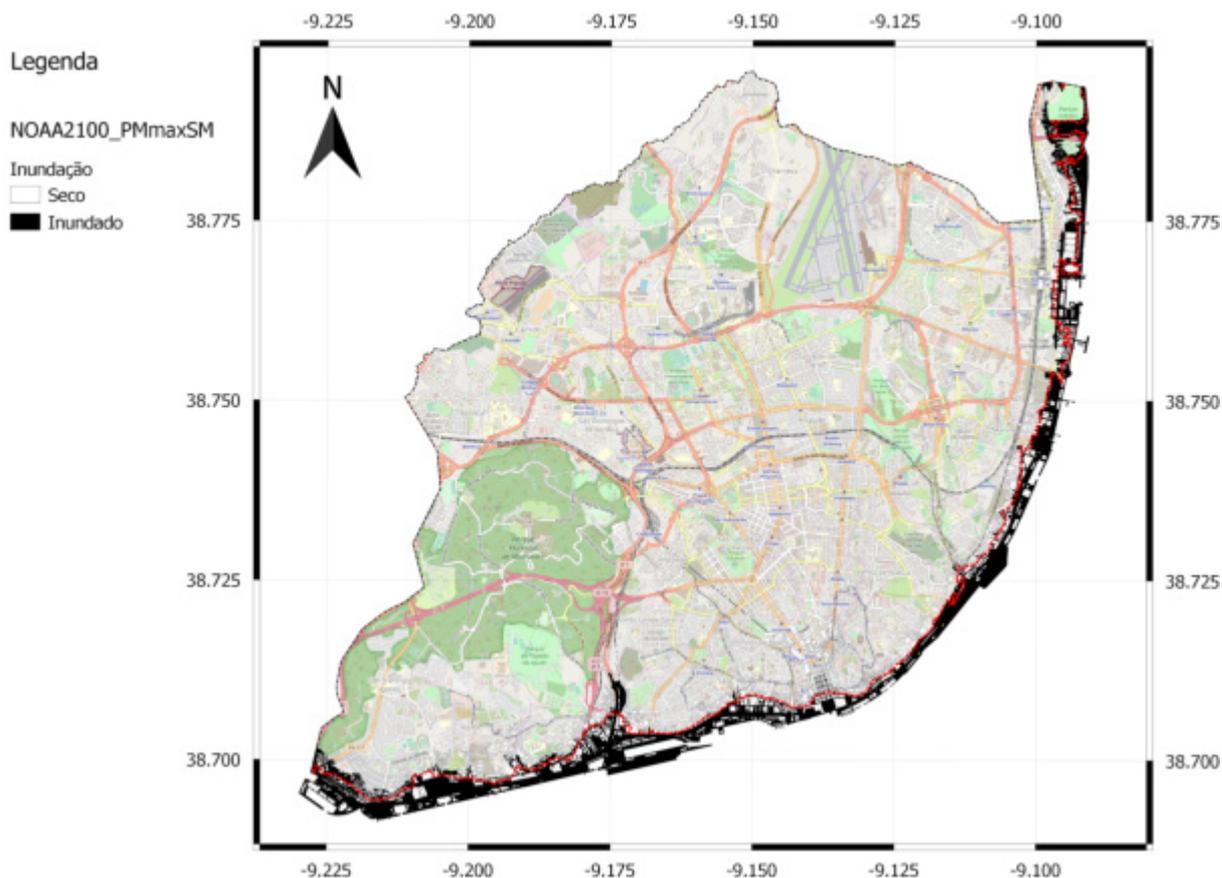


Figura 12 - Inundação da zona de Lisboa para o cenário 2100 com variação do nível do mar. A zona sombreada expressa a extensão da inundação decorrente do tsunami. A linha vermelha representa o limite da inundação sobre a qual o tsunami se propaga, i.e., a inundação da maré para o cenário de 2100 da NOAA.

Quanto ao primeiro fator, lembre-se que esta simulação inclui o efeito da resistência parietal, expressa pela fórmula de Manning-Strickler com um coeficiente de $70 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, valor típico de superfícies asfaltadas (Chow, 2009) e usado em estudos de validação da propagação de tsunamis em meios urbanos (Park et al., 2013). O segundo fator, o efeito do edificado, será o mais relevante para explicar as diferenças observadas entre as figuras 10 e 12. Nesta simulação a malha de cálculo permite resolver o escoamento ao longo das ruas. A interação entre o edificado e o escoamento resulta numa perda de quantidade de movimento e de energia do tsunami à medida que se propaga na malha urbana sobre a inundação de maré: na esteira de cada edifício ou quarteirão desenvolvem-se zonas de escoamento separado (coloquialmente designados “remansos”, no contexto fluvial) que estão associados a elevadas perdas de energia do tsunami. Estas zonas estão também associadas a diferenças elevadas de pressão entre a face exposta do edifício e a zona de esteira, o que constitui a

componente principal da perda de quantidade de movimento do escoamento que configura a força hidrodinâmica sobre o edifício ou quarteirão.

No caso de o tsunami incidir diretamente sobre a malha urbana (frente de onda do tsunami paralela à linha de costa), o escoamento ganha, num primeiro momento, energia potencial (altura) em frente à primeira linha de edifícios, transformando essa energia em energia cinética (velocidade) e, portanto, capacidade de penetração na malha urbana. No caso da zona ribeirinha de Lisboa, a frente de onda propaga-se de forma oblíqua - quase ortogonal - à frente de rio, situação ilustrada qualitativamente nas figuras 13 (com edificado e resistência parietal) e 14 (sem edificado).

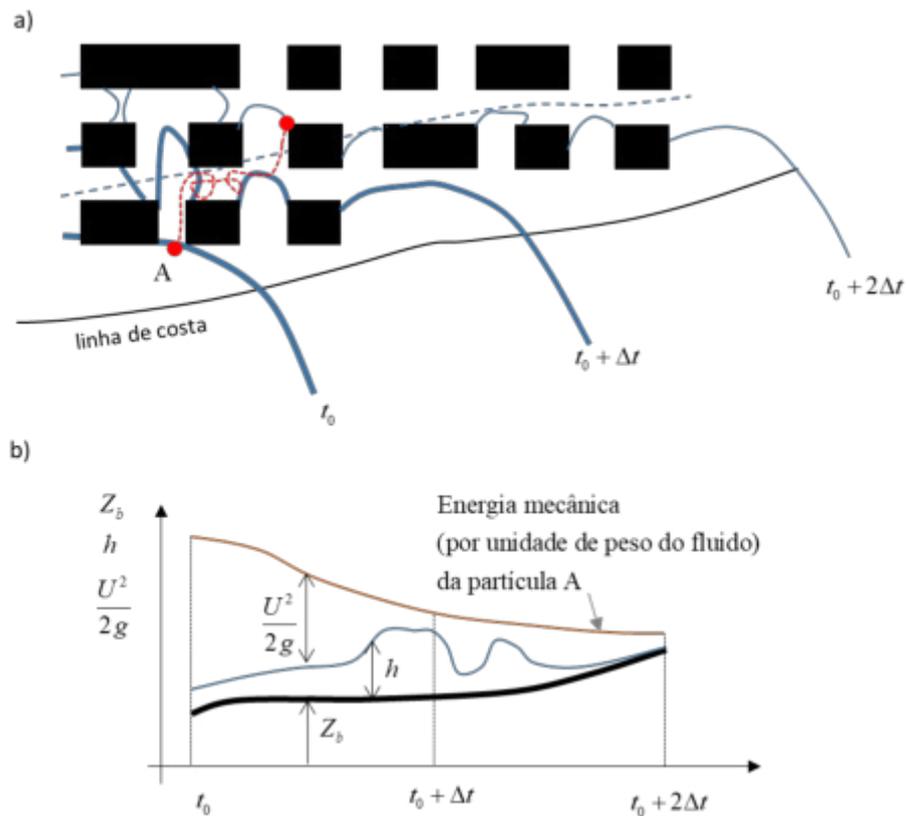


Figura 13 - a) Representação esquemática do run-up no caso da propagação do tsunami com edificado e resistência parietal. b) Evolução da energia mecânica do escoamento por unidade de peso do fluido da partícula A. As parcelas da energia mecânica do escoamento por unidade de peso do fluido são a cota do terreno, Z_b , a profundidade, h , e a energia cinética por unidade de peso do fluido, $U^2/(2g)$, em que U é a velocidade da partícula e g é a aceleração da gravidade. Linha azul tracejada corresponde à inundação inicial.

Neste caso o tsunami não tende a aumentar a energia potencial em frente à primeira fila de obstáculos, prosseguindo o seu avanço para dentro do estuário. Daqui resulta que a primeira fila de obstáculos (edifícios que sobreviveram ao sismo ou os seus escombros) regista um nível de inundação por tsunami pouco superior ao que se registaria sem edifícios. Dito de outra forma, a energia disponível para o run-up é praticamente idêntica nos casos com e sem edificado, devido ao confinamento associado ao

trecho final do estuário do Tejo – nas figuras 13 e 14 a posição da linha castanha é igual no instante inicial $t = t_0$. No caso de haver edificado (e resistência parietal realista), essa energia é rapidamente perdida na interação com os edifícios (ou os seus escombros).

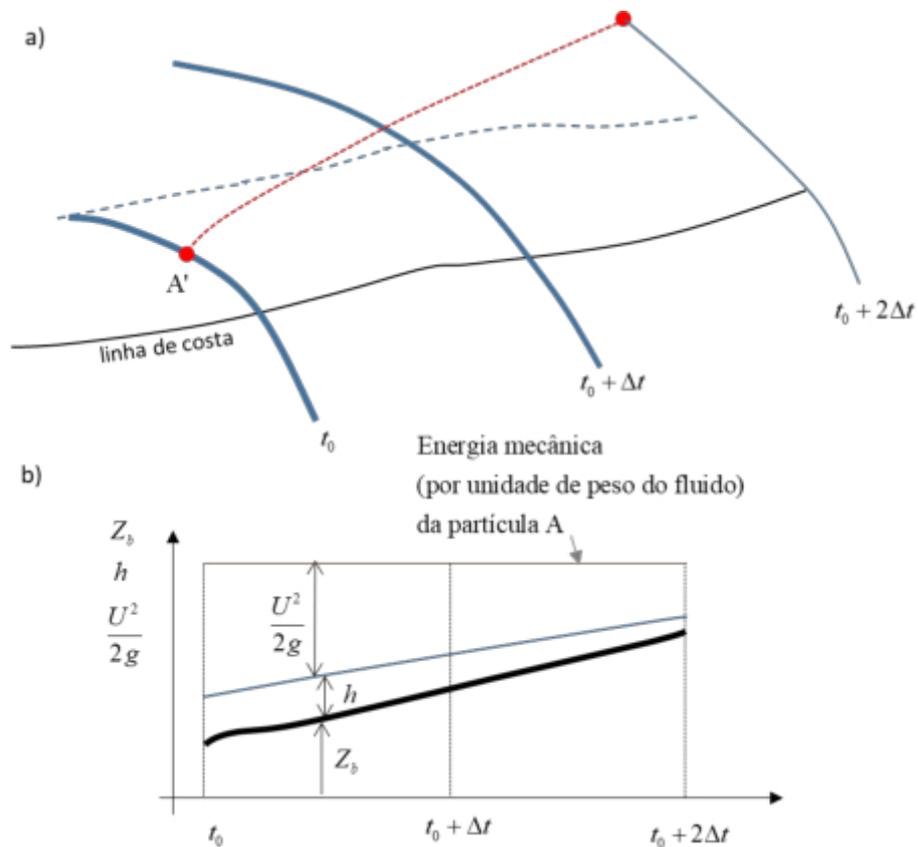


Figura 14 - a) Representação esquemática do run-up no caso da propagação do tsunami sem edificado e sem resistência parietal. b) Evolução da energia mecânica do escoamento por unidade de peso do fluido da partícula A'. As parcelas da energia mecânica do escoamento por unidade de peso do fluido são a cota do terreno, Z_b , a profundidade, h , e a energia cinética por unidade de peso do fluido, $U^2/(2g)$, em que U é a velocidade da partícula e g é a aceleração da gravidade. Linha azul tracejada corresponde à inundação inicial.

Na figura 13, mostra-se a evolução da energia mecânica do escoamento (por unidade de peso do fluido) para uma partícula de fluido que se encontra junto à frente de onda no instante inicial $t = t_0$. A perda de energia mecânica à medida que o tsunami penetra na zona edificada é representada (esquemáticamente) pela tendência decrescente da linha castanha. Quando esta linha estiver ao nível da linha negra (que representa a cota do terreno) a inundação cessa o seu avanço. A situação representada na figura 13 é esquemática mas realista – a trajetória da partícula é complexa devido aos “remansos” na esteira dos edifícios ou escombros.

No caso de não haver edificado e de não haver resistência parietal, a trajectória de uma partícula A' que se encontra na mesma posição inicial é mais simples (Fig. 14). A sua energia inicial conserva-se e o tsunami pode espalhar-se até à cota associada a essa energia inicial, ou seja a partícula só perde totalmente a sua velocidade quando a cota do terreno atingir a cota associada à energia inicial. Na figura 14, essa situação ocorre quando a linha negra atingir a linha castanha. Em relação à situação descrita na figura 13, a distância em relação à linha de costa será muito superior.

No caso da simulação com edificado, a extensão da inundação em excesso da inundação de maré é significativa nas zonas de Pedrouços (em particular na zona cuja fronteira ocidental é Algés), Cordoaria, Alcântara, Baixa Pombalina, Parque das Nações e ETAR de Beirolos (Fig. 12). Em Pedrouços, a inundação de maré atinge a Rua de Pedrouços. A inundação de tsunami pode estender-se até à estrada da Circunvalação, à Rua Soldados da Índia e subir a Av. da Torre de Belém até ao cruzamento com a R. Tristão da Cunha. Em Belém, a inundação de maré ocupa o Jardim da Praça do Império, o Jardim de Belém e o Jardim Afonso de Albuquerque. Para além desta inundação, o tsunami provoca inundação ao longo da R. dos Jerónimos e da Calçada da Ajuda. Na zona da Cordoaria, são inundadas pelo tsunami as ruas Pinto Ferreira e Artur Lamas, entre outras. Em Alcântara regista-se a maior extensão da inundação. A maré pode penetrar até à Rua de Alcântara. A inundação de tsunami propaga-se até cerca de 1600 m desde a marina de Alcântara e ao longo da Avenida de Ceuta, até às bombas de gasolina. Ao longo da Madragoa e no aterro da Boavista, a inundação por tsunami exhibe maiores profundidades de escoamento mas é pouco mais extensa, devido aos elevados declives do terreno observáveis na faixa Necessidades-Santa Catarina. A Baixa Pombalina é inundada pela maré até à Rua da Conceição. A inundação por tsunami pode atingir o quarteirão entre a Rua de Sta. Justa e a Praça da Figueira, ao longo da Rua da Prata. Apesar do reticulado urbano da Baixa ser perpendicular à linha de costa, a penetração do tsunami não se faz sentir até ao Rossio ou Praça da Figueira porque o escoamento se dá com perdas significativas de energia. Entre a Baixa Pombalina e o Parque das Nações, a inundação por tsunami é pouco mais extensa que a inundação de maré. No Parque das Nações a inundação por tsunami pode atingir a Alameda dos Oceanos e envolver os edifícios da Feira Internacional de Lisboa. A inundação por tsunami pode ainda circundar o Parque Tejo junto à ETAR de Beirolos.

A profundidade máxima do escoamento diminui no interior da malha urbana (Fig. 15) o que traduz a perda de energia da onda e a conversão de energia potencial em energia cinética. As velocidades, pelo contrário, e devido ao confinamento exercido pelos edifícios, podem atingir valores elevados, da ordem dos $10-12 \text{ ms}^{-1}$, em alguns locais na zona ocidental de Lisboa (Fig. 16). No Anexo A2.2 pode

encontrar-se uma descrição pormenorizada da distribuição espacial de velocidades e profundidades do escoamento relativas a este cenário.

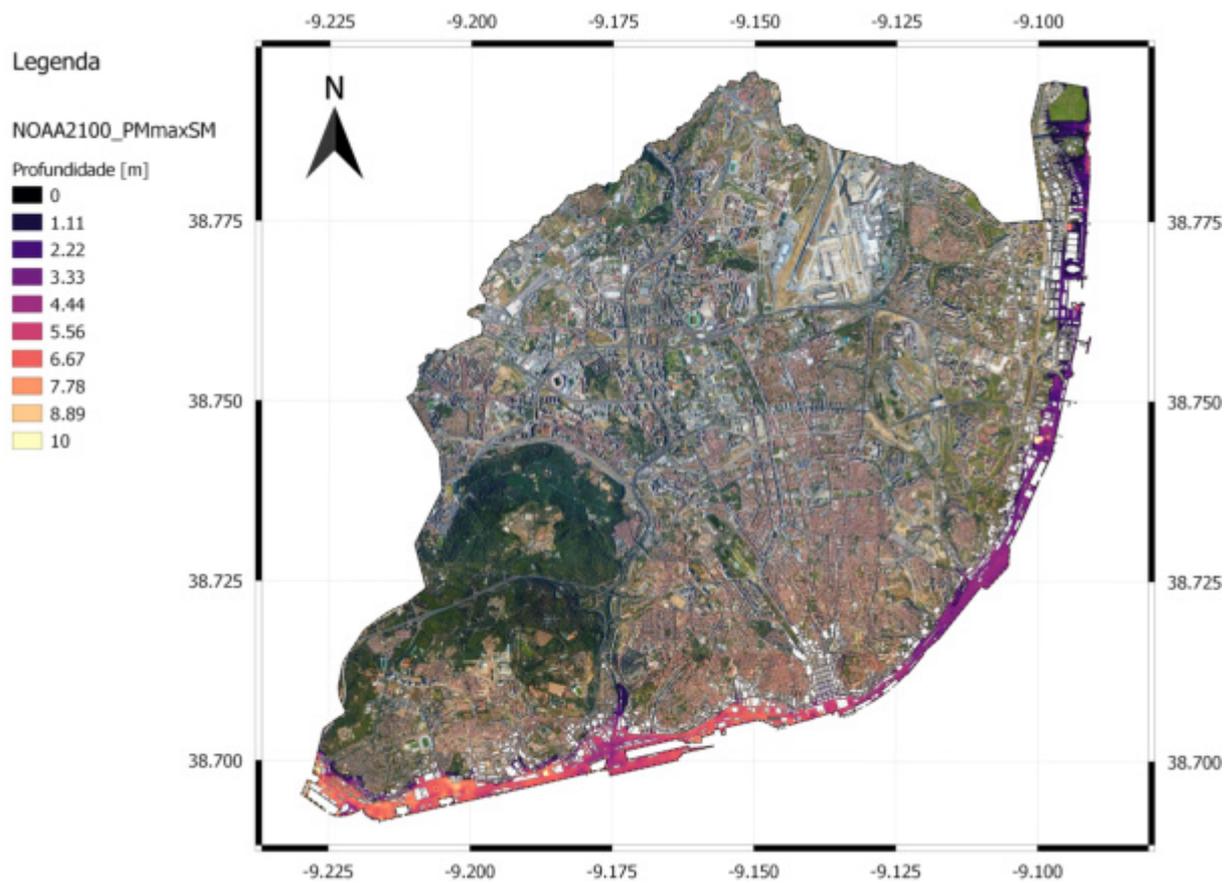


Figura 15 - Profundidade da inundação. Cenário NOAA2100_PMmaxSM.

Para aferir a estabilidade de pessoas e edificado interessa conhecer a combinação de velocidades e profundidades do escoamento. Para seres humanos, profundidades elevadas representam perigo elevado, independentemente da velocidade. No entanto, profundidades baixas podem também representar perigo elevado se a velocidade for elevada. Karvonen et al. (2000) desenvolveram um índice de perigosidade que traduz o impacto do escoamento sobre a estabilidade de seres humanos. Baseia-se na distribuição de profundidades da inundação (h) e de velocidades (U). Foi adaptado para tsunamis, por Conde et al. (2015), resultando no critério descrito na tabela 4.

Tabela 4 - Índice de perigosidade

Perigosidade	Critério hidrodinâmico
Elevada para grupos de risco	$U h < 0.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e $h < 0.5 \text{ m}$ e $U < 3 \text{ ms}^{-1}$
Elevada generalizada	$0.5 \text{ m}^2\text{s}^{-1} < U h < 1.0 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e $h < 1.0 \text{ m}$ e $U < 3 \text{ ms}^{-1}$
Extrema	$1.0 \text{ m}^2\text{s}^{-1} < U h$ ou $h > 1.0 \text{ m}$ ou $U > 3 \text{ ms}^{-1}$

Perigosidade elevada para grupos de risco é definida como uma situação de escoamento em que crianças e pessoas com mobilidade condicionada não têm condições para sair da corrente pelos seus próprios meios. A perigosidade extrema corresponde à situação de escoamento em que pessoas com excepcionais capacidades físicas não têm condições para sair da corrente pelos seus próprios meios. A perigosidade elevada generalizada corresponde à situação intermédia.

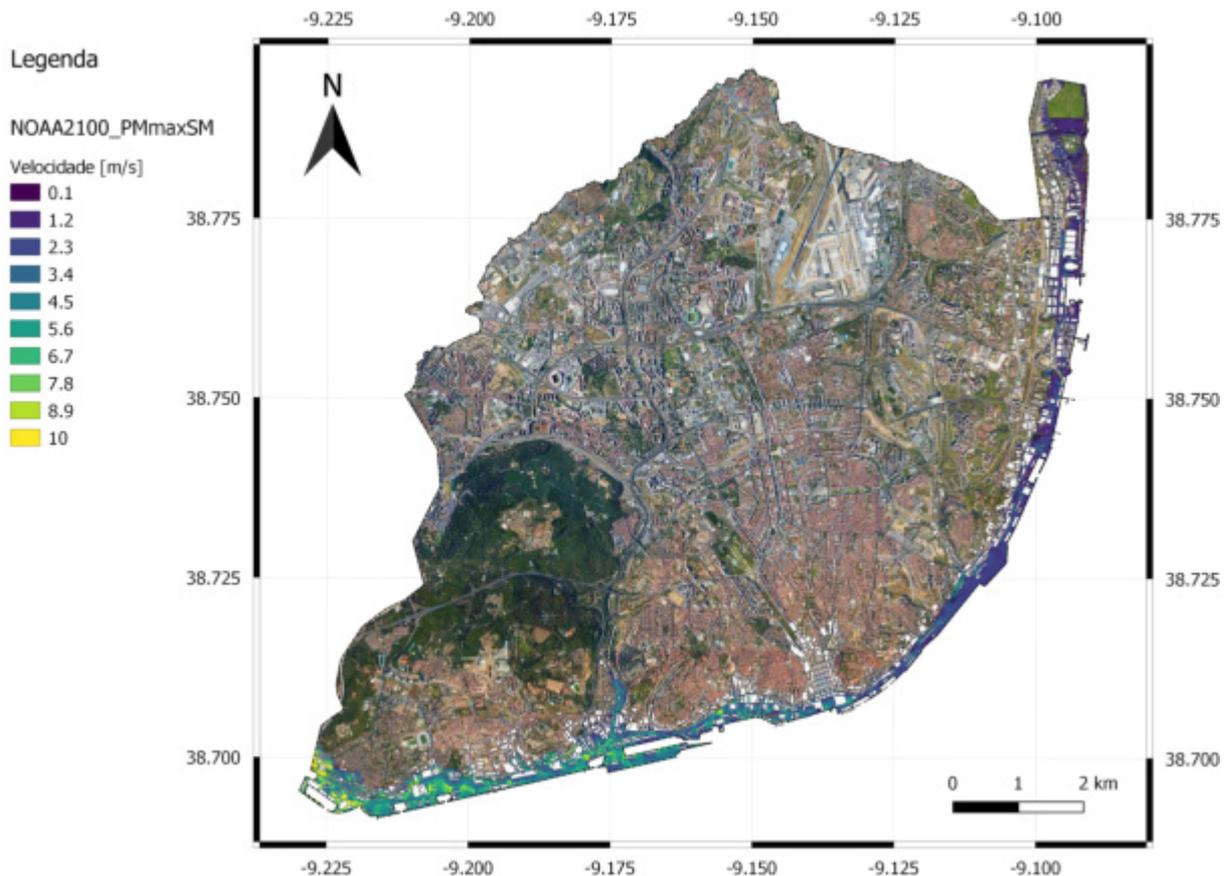


Figura 16 - Velocidades do escoamento. Cenário NOAA2100_PMmaxSM.

Na figura 17 mostram-se os resultados para o cenário mais gravoso - NOAA2100_PMmaxSM. Pode encontrar-se no Anexo A2.2 uma descrição mais pormenorizada da distribuição do factor de perigosidade.

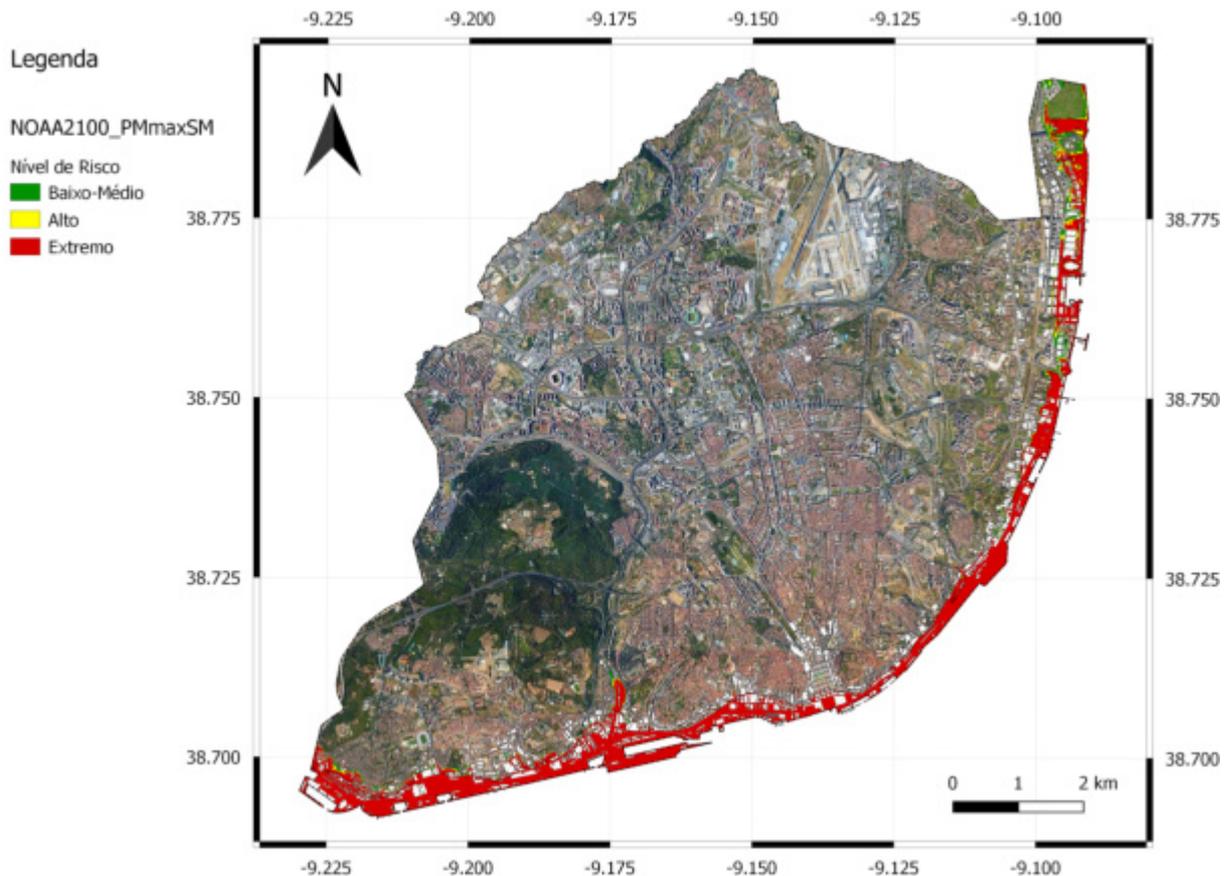


Figura 17 - Índice de perigosidade. Cenário NOAA2100_PMmaxSM.

As simulações determinísticas com e sem edificado foram realizadas com ferramentas numéricas diferentes. No Anexo A4 procede-se a uma análise da consistência das ferramentas utilizadas. Assumindo as diferenças quanto ao método de discretização utilizado e à forma e dimensão das células de cálculo, mostra-se que o conteúdo hidrodinâmico de ambos os modelos é idêntico.

5.2 Cartografia da inundação por tsunami – Método Probabilístico

As probabilidades de ocorrência de inundação por tsunami na zona de Lisboa considerando a variação do nível do mar para os cenários de 2050 e 2100 (cenários NOAA2050_PMmaxSM e NOAA2100_PMmaxSM, respetivamente) encontram-se nas figuras 18 e 19. Para este estudo foram consideradas todas as fontes sísmicas das três áreas tsunamigénicas descritas na secção 4.4.1 e as suas respetivas taxas de recorrência (ver Anexos B e C), além da probabilidade cumulativa de excedência de níveis do mar.

A análise dos resultados probabilísticos da perigosidade de tsunami (Figs. 18 e 19) mostra uma probabilidade de ocorrência de inundação relativamente baixa na maioria das zonas inundadas, menos de 15% para o cenário 2050. Isso deve-se ao facto de que a probabilidade de ocorrer um grande tsunami com um nível do mar alto é muito baixa.

Nas figuras 18 e 19 podemos verificar que os cenários de 2050 e 2100 não diferem significativamente na extensão da inundação, sendo que a diferença mais relevante em termos de área inundada se pode verificar na parte oriental da cidade de Lisboa. Em particular, entre o Braço de Prata e Sacavém onde para o cenário de 2050 não há probabilidade de inundação por tsunami. A razão desta diferença deve-se ao facto de que a subida do nível do mar para o cenário 2100 é mais significativa do que para o cenário 2050. Assim, os cenários de 2050 e 2100 diferem essencialmente na probabilidade de ocorrência de inundação. Para o cenário de 2050 a probabilidade máxima de ocorrência inundação por tsunami é registada na zona do Cais do Sodré com valores na ordem dos 30%. Nas restantes áreas inundadas a probabilidade de ocorrência é mais baixa, sendo que entre o limite oeste da cidade de Lisboa e o Cais do Sodré não excede os 20%.

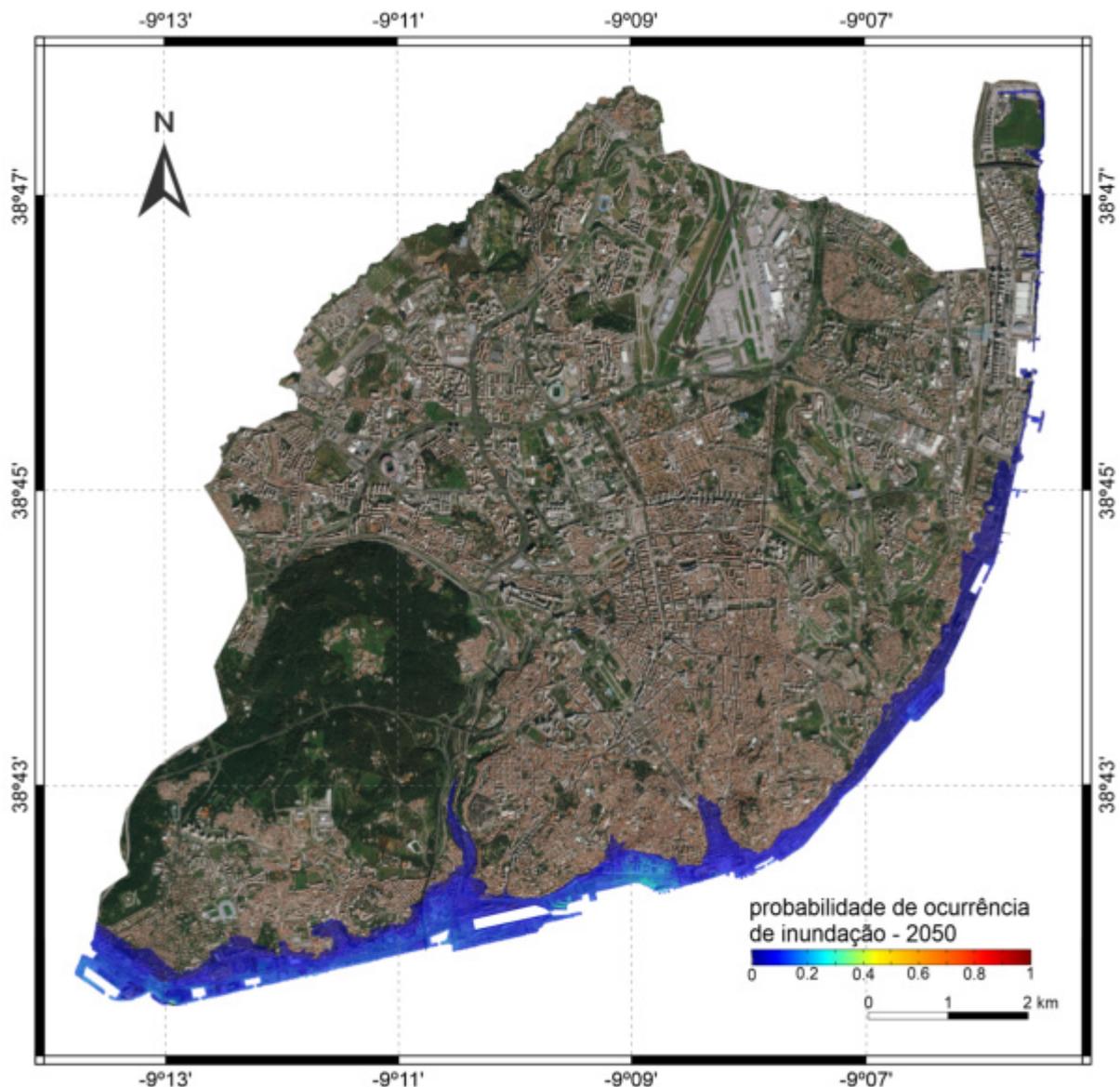


Figura 18 - Probabilidade de ocorrência de inundação por tsunami para o cenário 2050.

Para o cenário de 2100, é observado na zona do Cais do Sodré uma probabilidade máxima na ordem dos 80%. Para este cenário verifica-se uma distribuição mais heterogénea da probabilidade de ocorrência de inundação. As zonas ribeirinhas entre o limite oeste da cidade de Lisboa e a zona de Alfama apresentam probabilidade de ocorrência entre 40-60%. Na zona oriental da cidade de Lisboa as probabilidades obtidas são mais baixas não excedendo os 20% e resultam da subida do nível do mar.

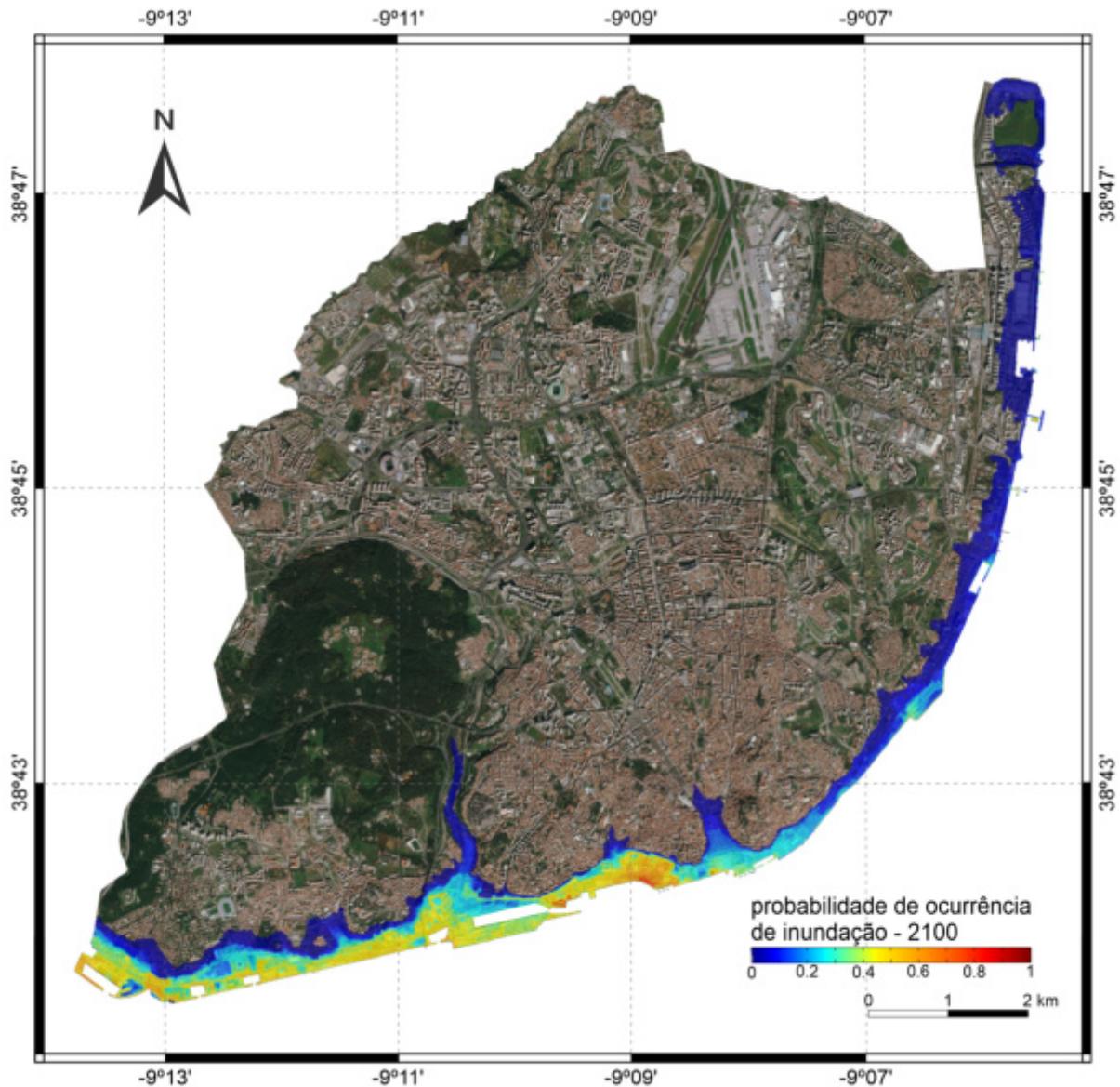


Figura 19 - Probabilidade de ocorrência de inundação por tsunami para o cenário 2100.

6 Conclusões

As seguintes conclusões podem ser desenhadas:

1. No caso de um tsunami semelhante ao ocorrido em 1755, o impacto na zona costeira de Lisboa depende do nível do mar no qual o tsunami chega;
2. A combinação do pior cenário de tsunami e do cenário mais gravoso da subida do nível do mar resulta em um grande impacto na cidade de Lisboa;
3. Para o nível do mar correspondente ao cenário de 2050, o tsunami causa a inundação de uma área com cerca de 6.06 km², com profundidades de inundação de 5-12 m e extensão máxima de 2250 m ao longo da Avenida de Ceuta, quando consideramos um modelo da cidade sem edificado;
4. Para o cenário mais gravoso do nível do mar de 2100, o tsunami causa uma inundação mais significativa em Lisboa. A área inundada com cerca de 7.99 km² apresenta profundidades de inundação de 8-13 m nas zonas ribeirinhas, e uma extensão máxima de 2600 m até à ETAR da Avenida de Ceuta, quando consideramos um modelo da cidade sem edificado;
5. O impacto por tsunami na cidade de Lisboa é significativo, mas inferior quando considerado o edificado e o cenário mais gravoso do nível do mar de 2100. Tal deve-se à inclusão de resistência de fundo e sobretudo ao efeito do edificado;
6. Para o cenário mais gravoso do nível do mar de 2100 com edificado, a extensão da inundação é significativa nas zonas de Algés, Cordoaria, Alcântara, Baixa Pombalina, Parque das Nações e ETAR de Beirolos, em particular, estendendo-se até cerca de 1600 m desde a marina de Alcântara e ao longo da Avenida de Ceuta;
7. As probabilidades de ocorrência de inundação por tsunami na cidade de Lisboa são baixas. Para 2050, a maioria da área vulnerável à inundação encontra-se com probabilidades inferiores a 15%. Estas probabilidades aumentam quando considerado o cenário de 2100;
8. As zonas de Lisboa que mostram probabilidades de ocorrência de inundação mais altas, o Cais do Sodré com probabilidades de 30% para 2050 e 80% para 2100, são zonas mais vulneráveis à inundação devido à subida do nível do mar, mas também devido às condições favoráveis de amplificação offshore das ondas incidentes de tsunami;

Os resultados deste estudo devem levar em consideração as seguintes limitações:

1. A incerteza nas fontes sísmicas; há limites no catálogo sísmico que se relacionam com o período relativamente curto coberto pela sismologia instrumental, e a escassez de descrição valiosa sobre os eventos históricos;

2. O conhecimento/incerteza dos mecanismos de rutura da fonte sísmica que causa tsunamis e que pode constituir uma importante fonte de erro na modelação numérica de tsunamis, uma vez que a condição inicial para a simulação numérica é determinada pelo modelo de deslocamento do fundo oceânico;
3. Limitação no modelo digital de terreno, em particular, a batimetria do Tejo usada neste trabalho é de resolução de 10 m tendo sido interpolada para ~2 m para as simulações de perigosidade de tsunami com edificado;
4. Limitação nos modelos numéricos de simulação de tsunami, nomeadamente, a não consideração dos danos causados por tsunamis nas estruturas aquando o impacto da onda.

Referências

1. Antunes, C., Catita, C., Rocha, Carolina R. (2017). 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. Relatório Instituto Dom Luiz.
2. Argus, D. F., Gordon, R. G., DeMets, C., & Stein, S. (1989). Closure of the Africa-Eurasia-North America plate motion circuit and tectonics of the Gloria fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B5), 5585-5602.
3. Baptista, M. A., & Miranda, J. M. (2009). Revision of the Portuguese catalog of tsunamis. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 9, 25–42.
4. Baptista, M. A., Miranda, J. M., Omira, R., & Antunes, C. (2011). Potential inundation of Lisbon downtown by a 1755-like tsunami. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 11, 3319–3326.
5. Buforn, E., Bezzeghoud, M., Udias, A., & Pro, C. (2004). Seismic sources on the Iberia-African plate boundary and their tectonic implications. *Pure and Applied Geophysics*, 161(3), 623-646.
6. Chow, V.T. (2009) *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill civil engineering series (1st edition 1959), Blackburn Press, ISBN 1932846182, 9781932846188, 680 pp.
7. Conde, D., Baptista, M. A., Telhado, M.J. & Ferreira, R.M.L. (2015) Severity and exposure associated to tsunami actions in urban waterfronts. The case of Lisbon, Portugal. *Natural Hazards*, 79(3): 2125-2144. Doi: 10.1007/s11069-015-1951-z.
8. Dao, M. H., & Tkalich, P. (2007). Tsunami propagation modeling—a sensitivity study. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 7, 741–754.
9. Duarte, J. C., Rosas, F. M., Terrinha, P., Schellart, W. P., Boutelier, D., Gutscher, M. A., & Ribeiro, A. (2013). Are subduction zones invading the Atlantic? Evidence from the southwest Iberia margin. *Geology*, 41(8), 839-842.
10. Fernandes, R. M. S., Ambrosius, B. A. C., Noomen, R., Bastos, L., Wortel, M. J. R., Spakman, W., et al. (2003). The relative motion between Africa and Eurasia as derived from ITRF2000 and GPS data. *Geophysical Research Letters*, 30(16), 1828.
11. Geist, E. L., & Parsons, T. (2006). Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards. *Natural Hazards*, 37(3), 277–314.
12. Gonzalez, F. I., Geist, E. L., Jaffe, B., Kaˆnogˆlu, U., Mofjeld, H., Synolakis, C. E., et al. (2009). Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources. *Journal of Geophysical Research (Oceans)*, 114(C11), 1978–2012.
13. Gonzalez, F. I., Randall, J. L., & Loyce, M. A. (2013). Probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) for Crescent City, CA. Final Report for Phase I. University of Washington Department of Applied Mathematics. <http://faculty.washington.edu/rjl/pubs/CCptha/CCpthaFinalReport.pdf>. Accessed 01 Feb 2016.
14. Gutscher, M. A., Malod, J., Rehault, J. P., Contrucci, I., Klingelhoefer, F., Mendes-Victor, L., et al. (2002). Evidence for active subduction beneath Gibraltar. *Geology*, 30(12), 1071–1074.
15. Harbitz, C. B., Glimsdal, S., Bazin, S., Zamora, N., Løvholt, F., Bungum, H., et al. (2012). Tsunami hazard in the Caribbean: Regional exposure derived from credible worst case scenarios. *Continental Shelf Research*, 38, 1–23.
16. Johnston, A. (1996). Seismic moment assessment of earthquakes in stable continental regions III. New Madrid, 1811–1812, Charleston 1886 and Lisbon 1755. *Geophysical Journal International*, 126, 314–344.
17. Kaabouben, F., Baptista, M. A., Brahim, A. I., El Mouraouah, A., & Toto, A. (2009). On the moroccan tsunami catalogue. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 9, 1227–1236.
18. Karvonen, R., Hepojoki, H., Huhta, H. & Louhio, A. (2000). The Use of Physical Models in Dam-Break Flood Analysis: Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis (RESCDAM) (Final Report). Helsinki University of Technology & Finnish Environment Institute

19. Kijko, A. (2004). Estimation of the maximum earthquake magnitude, m_{max} . *Pure and Applied Geophysics*, 161, 1655–1681
20. Lander JF, Whiteside LS, Lockridge PA (2002) Brief history of Tsunamis in the Caribbean Sea. *Sc. of Tsunami Hazards* 20(2): 57–94.
21. Liu, P. L. F., Woo, S. B., & Cho, Y. S., (1998). Computer programs for tsunami propagation and inundation. Technical report, Cornell University.
22. Matias, L. M., Cunha, T., Annunziato, A., Baptista, M. A., & Carrilho, F. (2013). Tsunamigenic earthquakes in the Gulf of Cadiz: fault model and recurrence. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 13(1), 1–13.
23. Mercado, A., & McCann, W. (1998). Numerical Simulation of the 1918 Puerto Rico Tsunami. *Natural Hazards*, 18, 57–76.
24. Miranda, J. M., Luis, J., Reis, C., Omira R., & Baptista, M. A. (2014). Validation of NSWING, a multi-core finite difference code for tsunami propagation and run-up. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco. Paper Number: S21A-4390. Session Number and Title: S21A, Natural Hazards.
25. Myers, E. P., & Baptista, A. M. (2001). Analysis of factors influencing simulations of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki and 1964 Alaska Tsunamis. *Natural Hazards*, 23, 1–28.
26. Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135–1154.
27. Omira, R., Matias, L., & Baptista, M. A. (2016). Developing an event-tree probabilistic tsunami inundation model for NE Atlantic coasts: Application to a case study. In *Global Tsunami Science: Past and Future, Volume I* (pp. 3775-3794). Birkhäuser, Cham.
28. Omira, R., Baptista, M. A., & Matias, L. (2015). Probabilistic Tsunami Hazard in the Northeast Atlantic from Near- and Far-Field Tectonic Sources. *Pure and Applied Geophysics*, 172(3), 901–920.
29. Omira, R., Baptista, M. A., Matias, L., Miranda, J. M., Catita, C., Carrilho, F., et al. (2009). Design of a sea-level tsunami detection network for the Gulf of Cadiz. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 9(4), 1327–1338.
30. Park, H., Cox, D.T., Lynett, P.J., Wiebe, D.M. & Shin, S. (2013). Tsunami inundation modeling in constructed environments: A physical and numerical comparison of free-surface elevation, velocity, and momentum flux. *Coastal Engineering*, 79, 9-21.
31. Rosas, F. M., Duarte, J. C., Neves, M. C., Terrinha, P., Silva, S., Matias, L., ... & Bartolomé, R. (2012). Thrust–wrench interference between major active faults in the Gulf of Cadiz (Africa–Eurasia plate boundary, offshore SW Iberia): tectonic implications from coupled analog and numerical modeling. *Tectonophysics*, 548, 1-21.
32. Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society America*, 84(4), 974–1002.
33. Zitellini, N., Gracia, E., Matias, L., Terrinha, P., Abreu, M. A., DeAlteriis, G., et al. (2009). The quest for the Africa-Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, 280(1), 13–50.

ANEXOS

Anexo A: Descrição detalhada da metodologia e dos modelos numéricos

A1 Limites dos níveis máximos de maré para cada cenário de NMM (FCUL)



Figura A1.1 - Mapeamento dos limites máximos dos cenários de inundação para 2050.



Figura A1.2 - Mapeamento dos limites máximos dos cenários de inundação para 2100.

A2 Método Determinístico de cálculo da perigosidade de tsunami com edificado (IST)

A discretização do domínio de cálculo na zona ribeirinha de Lisboa deve permitir a resolução do escoamento no espaço dos arruamentos entre edifícios. Todavia, em outras zonas do domínio de cálculo, não se justifica uma discretização tão fina uma vez que os processos hidrodinâmicos se caracterizam por maiores escalas espaciais. Deve portanto, usar-se uma malha de cálculo flexível, triangulada e não-estruturada, capaz de aderir corretamente à geometria da zona ribeirinha de Lisboa, densamente urbanizada.

Os tamanhos representativos para as células da malha de cálculo usada são, respetivamente:

- 2.0 m em todas as ruas e num perímetro de 25 m em torno de todos os edifícios do Concelho de Lisboa, até à cota de 50m;
- 10 m para zonas da frente ribeirinha do Concelho de Lisboa sem edificado próximo, até à cota de 50 m;
- 100 m para todas as restantes zonas do estuário do tejo.

A distribuição do tamanho das células de cálculo pode observar-se na figura A2.1

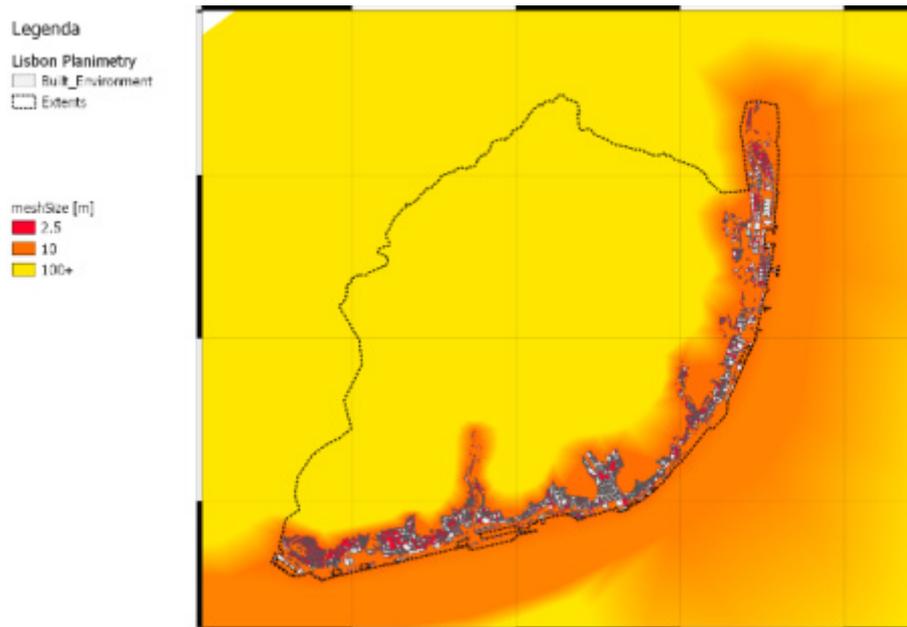


Figura A2.1 - Distribuição do tamanho das células ao longo do domínio de cálculo.

A2.1 Condições de Fronteira

As condições de fronteira, utilizadas nas simulações apresentadas de alta resolução espacial, correspondem ao cenário de referência descrito na secção 3.2. A série de alturas de onda a impor na foz do Tejo, numa secção coincidente com o farol do Bugio, está representada na figura A2.1.1.

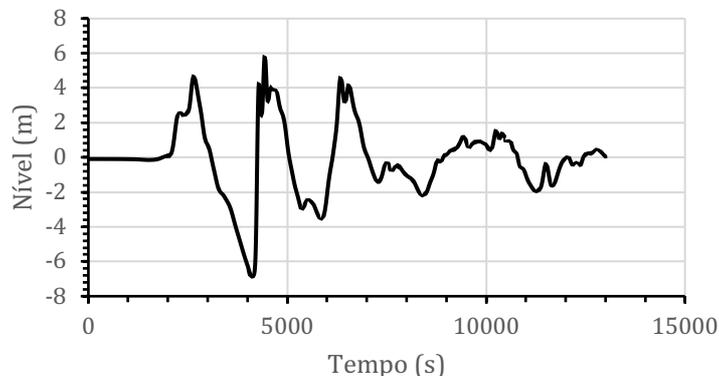


Figura A2.1.1 - Condição de fronteira imposta na foz do tejo (farol do Bugio).

A condição de fronteira implementada – aplicação de condições de Rankine-Hugoniot – permite determinar a série de velocidades do escoamento correspondente. Nos picos das ondas representadas na figura A2.1.1 obtêm-se velocidades entre 4 e 4.5 m/s, valores compatíveis com a quantidade de movimento, no mesmo local, obtido pelo modelo hidrodinâmico com o qual se gerou a série representada na figura A2.1.1.

A2.2 Descrição pormenorizada dos resultados das simulações com edificado

Nas figuras A2.2.1-A2.2.9 estão representados os resultados das simulações de alta resolução espacial para os cenários identificados na Tabela 2. O índice de perigosidade foi calculado com base na distribuição de profundidades da inundação e de velocidades de acordo com a metodologia descrita em Conde et al. (2015).

Cenário NOAA2100_PmmaxSM

Este cenário contempla o tsunami de referência combinado com a projecção de preia mar de águas vivas máxima e sobrelevação meteorológica para 2100.

Na figura A2.2.1 mostra-se o índice de perigosidade. Verifica-se perigosidade extrema em toda a zona de Algés, desde estrada da circunvalação e Rua D. Jerónimo de Osório até ao perímetro do Instituto de Altos estudos Militares.

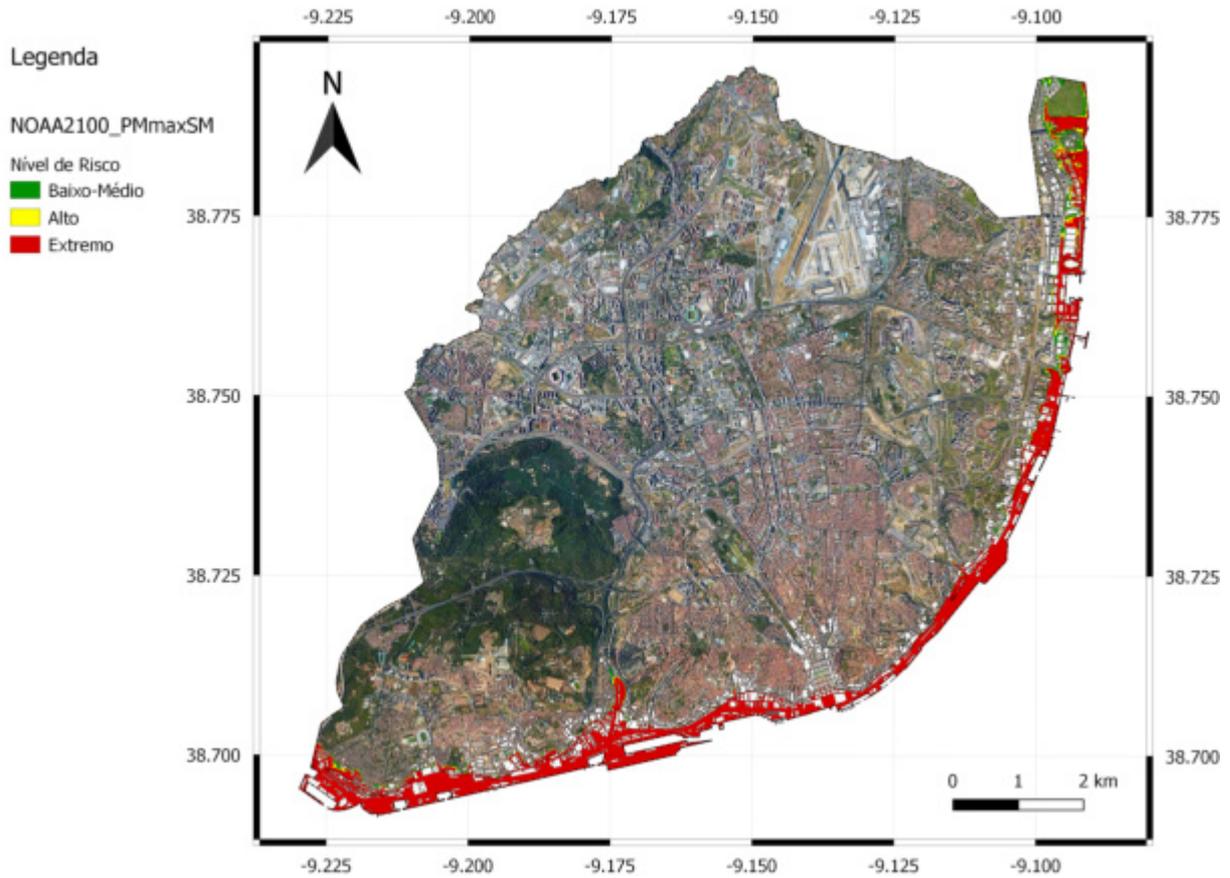


Figura A2.2.1 - Índice de perigosidade. Cenário NOAA2100_PmmaxSM.

Em Pedrouços, a Rua de Pedrouços é inundada com perigosidade extrema em toda a sua extensão, observando-se inundação até à cota do entroncamento com a Rua D. Cristóvão da Gama. A profundidade do escoamento (Fig. A2.2.2) atinge máximos de cerca de 9.5 m no início da Av. Da Índia. Registam-se correntes com velocidades máximas de 10-12 ms^{-1} no início da Av. Vasco da Gama e na envolvente norte do edifício da Fundação Champalimaud (Fig. A2.2.3), especialmente na fase de retirada da onda.

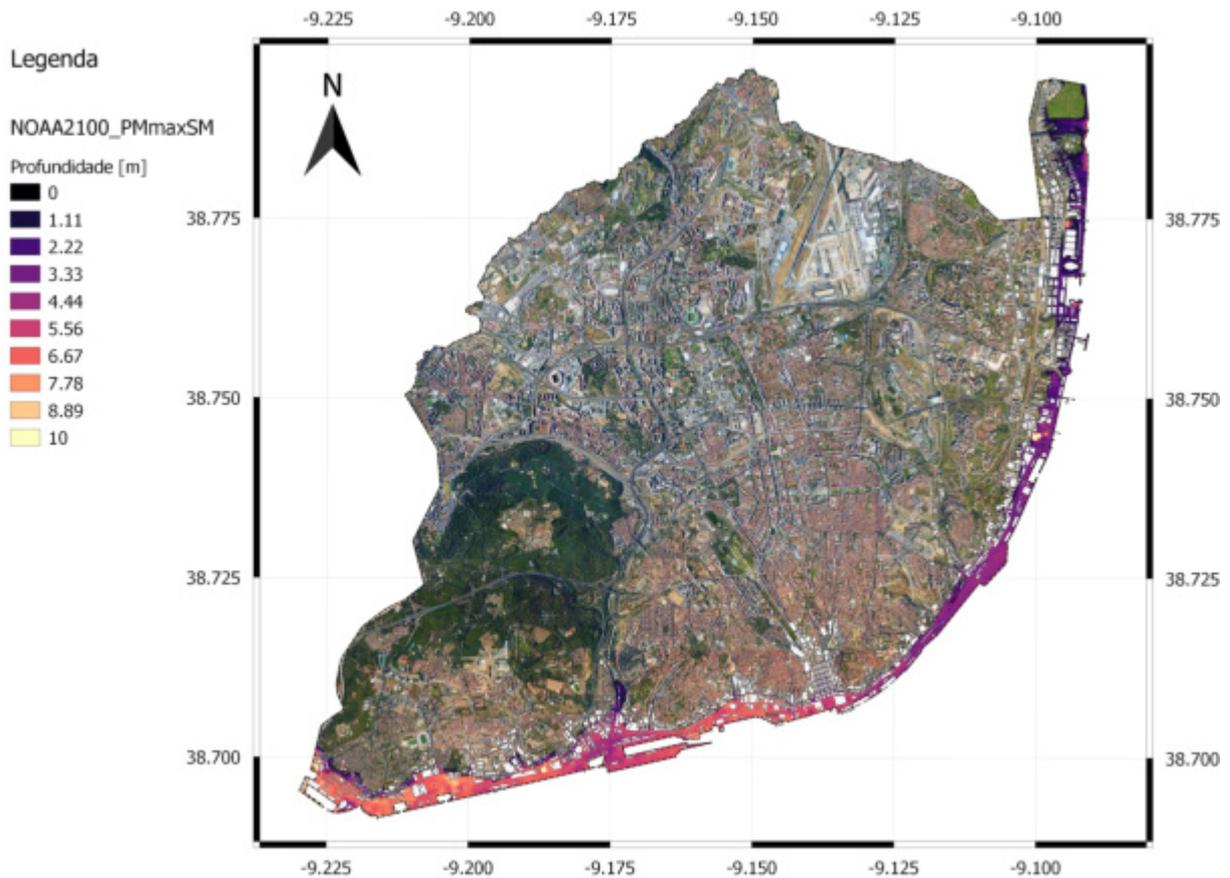


Figura A2.2.2 - Profundidade da inundação. Cenário NOAA2100_PmmaxSM.

Em Belém, regista-se inundação em toda a zona monumental, havendo perigosidade extrema na Rua Bartolomeu Dias, na esplanada do Planetário, em toda a envolvente do museu dos Jerónimos, na Rua de Belém até ao portão da Casa Pia, Rua de Belém, Jardins da Presidência até ao pátio das Damas, Rua da Junqueira e Rua Quinta do Almargem (Fig. A2.2.3). As alturas máximas do escoamento atingem os 8 m junto à Rua Vieira Portuense (Fig. A2.2.2).

O espaço entre a Praça do Império e a Praça Afonso de Albuquerque será inundada com perigosidade extrema, tal como toda a envolvente da Torre de Belém, do Padrão dos Descobrimentos, do CCB, do MAAT e do Museu dos Coches (Fig. A2.2.1). Formam-se correntes, especialmente na fase descendente da onda de mais de 9 ms^{-1} em frente à fachada nascente do CCB, junto ao edifício do Clube Naval de Lisboa e nas envolventes dos edifícios do MAAT (Fig. A2.2.3).

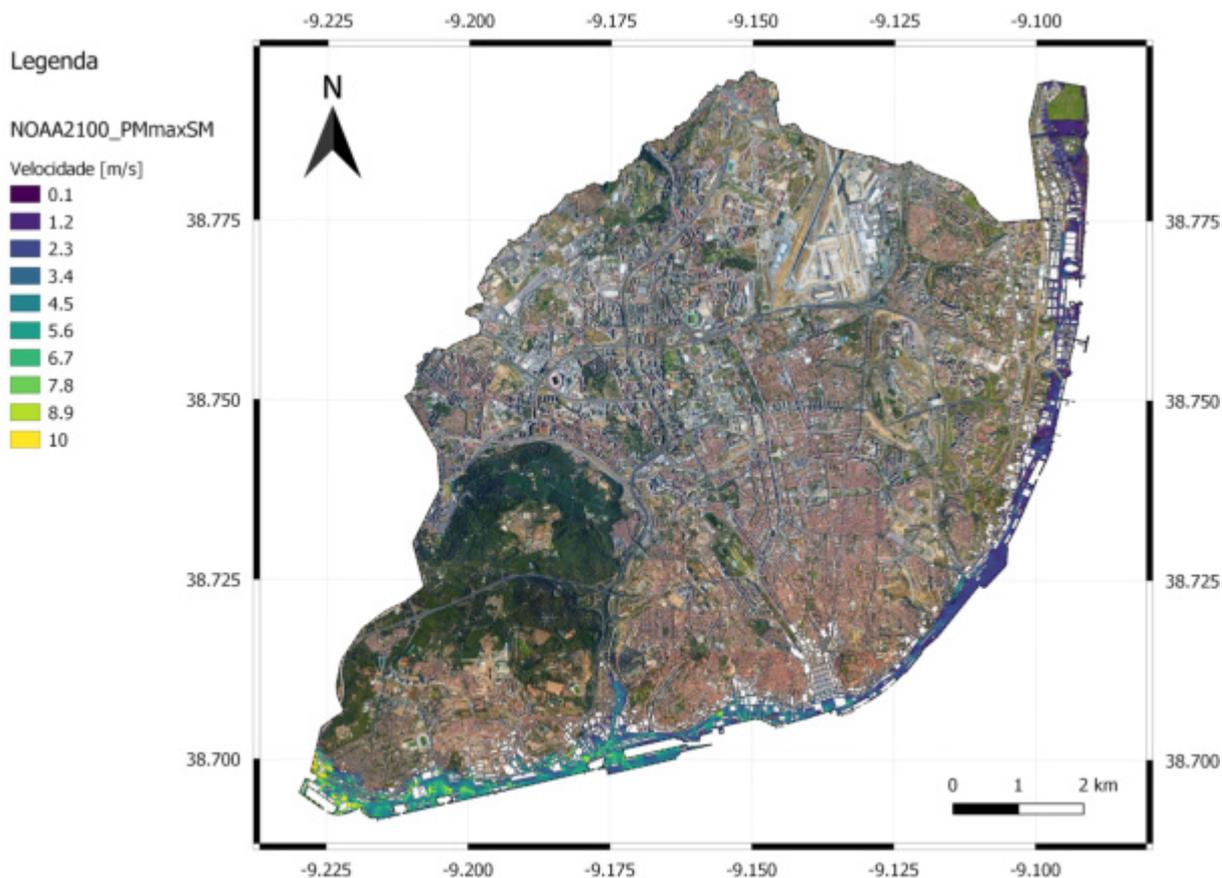


Figura A2.2.3 - Velocidades do escoamento. Cenário NOAA2100_PmmaxSM.

Em Alcântara regista-se a maior extensão da inundação, cerca de 1600 m desde a marina de Alcântara e ao longo da Avenida de Ceuta, até as bombas de gasolina (Figs. A2.2.1 e A2.2.2). A zona de elevada perigosidade estende-se até aos armazéns a norte da estac o de Alcântara Terra (Fig. 6). As maiores alturas do escoamento são atingidas junto ao edifício da Associa o Comercial Portuguesa. Registam-se correntes fortes ($8-9 \text{ ms}^{-1}$) na Rua 1  de Maio na Avenida da  ndia e Av. Brasília e entre a marina o Porto de Lisboa (Fig. A2.2.3).

Na zona do aterro da Boa Vista (das Janelas Verdes   estac o ferroviária do Cais do Sodré) regista-se perigosidade elevada (Fig. A2.2.1) e profundidades máximas de inunda o de cerca de 6.5 m (Fig. A2.2.2). A extensão máxima da inunda o inclui a Av. D. Carlos até ao cruzamento com a R. Poço dos Negros, podendo a onda entrar nessa rua, e a rua Instituto Industrial.

As velocidades máximas registam-se aquando do movimento descendente do tsunami, particularmente no final da Calçada Ribeiro Santos e entrada para o largo de Santos (cerca de 9 ms^{-1}). Verificam-se ainda velocidades elevadas (5.5 ms^{-1}) associadas às correntes que se formam entre os antigos edifícios da Lisnave e Porto de Lisboa.

A zona de São Paulo e Cais do Sodré, incluindo Rua do Arsenal até ao largo do Município,   classificada de risco extremo (Fig. A2.2.1), com alturas de inunda o máximas de cerca de 6 m junto ao terminal

de transportes fluviais (Fig. A2.2.2). As velocidades máximas são de 4-5 ms^{-1} em frente à entrada nascente da estação ferroviária do Cais do Sodré (Fig. A2.2.3).

A entrada da estação de Metropolitano do Cais do Sodré é afogada durante após o pico da primeira onda e, depois, após a segunda onda, mantendo-se sob cerca de 4 m de água durante mais de 1 hora. Poderá entrar na estação um volume superior a 250 mil m^3 , se a dimensão das galerias o permitir.

Na Baixa Pombalina a inundação pode estender-se até a Rua da Assunção, sendo de elevada perigosidade até a Rua de São Nicolau, especialmente ao longo da Rua da Prata (Fig. A2.2.1). As profundidades do escoamento serão superiores 6 m apenas junto ao torre o poente da Praça do Comércio e antigo edifício do arsenal e junto ao Cais das Colunas (Fig. A2.2.2). As velocidades mais elevadas não ultrapassam os 5 ms^{-1} e registam-se junto aos Torre es nascente e poente, sendo estas últimas as velocidades mais elevadas que se observam na Praça do Comércio (Fig. A2.2.3).

A perigosidade do tsunami  , ainda elevada ao longo das Ruas da Alfândega e Cais de Santarém, até a estac o de Santa Apol nia (Fig. A2.2.1). Registam-se velocidades de 3-4 ms^{-1} junto   estac o e discoteca Lux e alturas máximas de inundação de cerca de 4 m.

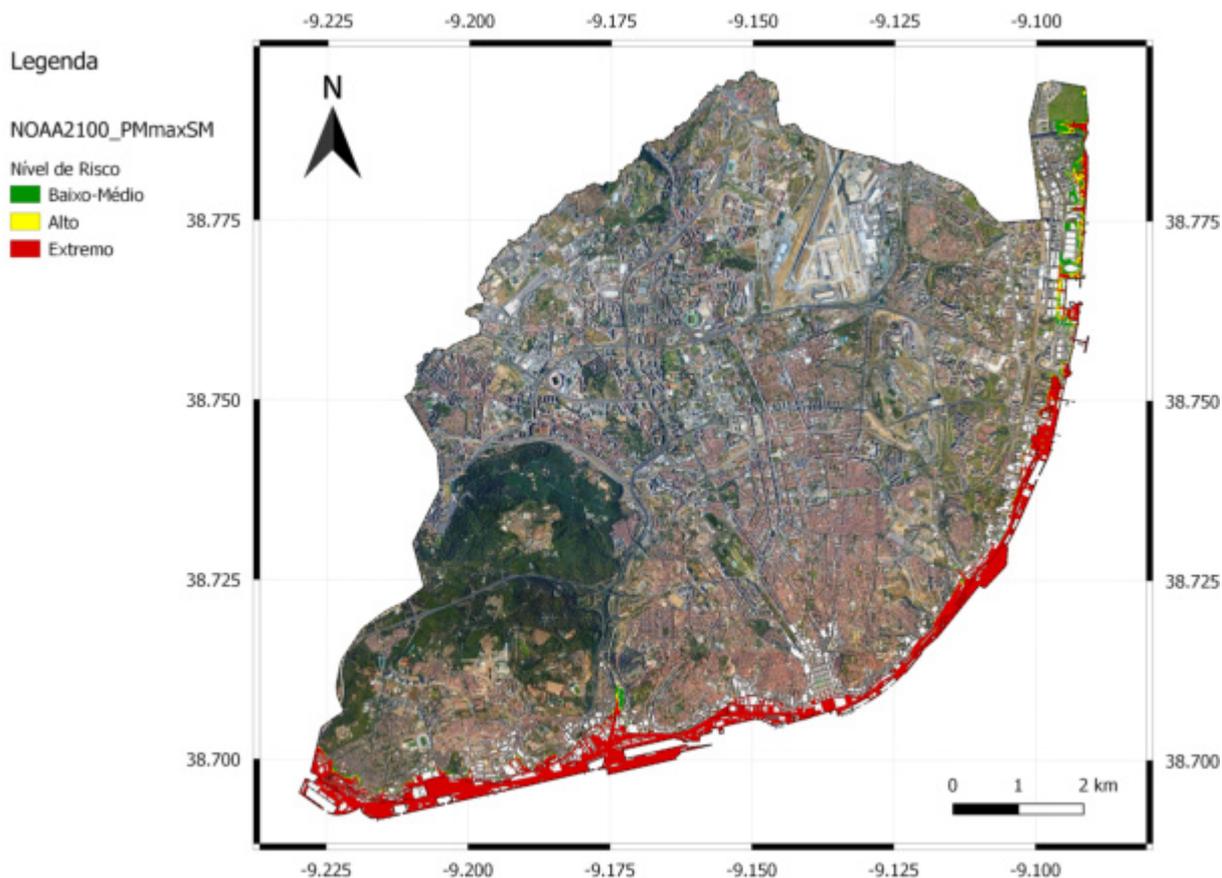
Ao longo da Av. Infante D. Henrique, desde o terminal de cruzeiros até ao terminal de Xabregas, a perigosidade mant m-se elevada (Fig. A2.2.1), com alturas do escoamento inferiores a 4 m e velocidades máximas de cerca de 3 ms^{-1} . Exceptua-se o entroncamento da Rua Gualdim Pais com a Rua Madre Deus, no qual, na fase de retirada da onda, se geram correntes com mais de 5 ms^{-1} .

Entre Xabregas e o Braço de Prata, quase toda a extensão da inundação   ainda classificada de perigosidade extrema (Fig. A2.2.1). As alturas da inundação podem ultrapassar os 3 m (Fig. A2.2.2) e as velocidades máximas podem alcanç r os 4 ms^{-1} em algumas zonas do Beato e Braço de Prata, em particular entre edifícios e nas Ruas do Beato e do Açúcar (Fig. A2.2.3).

Na zona do Parque das Nações, constata-se que há inundação mas de perigosidade não-extrema na zona do Cabo Ruivo uma vez que as alturas do escoamento são inferiores a 0.5 m (Fig. A2.2.2) e as velocidades inferiores a 0.7 ms^{-1} (Fig. A2.2.3). A perigosidade  , de novo, elevada em torno da doca do Oceanário, incluindo o edifício da FIL, o Casino de Lisboa e a sala de espetáculos (Fig. A2.2.1). As profundidades do escoamento podem atingir os 3 m junto ao Oceanário (Fig. A2.2.2) e as velocidades cerca de 3.5 ms^{-1} (Fig. A2.2.3).

A norte do edifício da FIL, a perigosidade   elevada apenas ao longo da Rua Ilha dos Amores, na ETAR de Beirolas e no Jardim do Passeio dos Heróis do Mar (Fig. A2.2.1). As profundidades do escoamento são da ordem dos 2 m (Fig. A2.2.2) e as velocidades máximas são inferiores a 1.5 ms^{-1} (Fig. A2.2.3).

Nas figuras A2.2.4 e A2.2.5 mostram-se os resultados da simulação para o cenário de subida do nível do mar da previsto pelos modelos da Faculdade de Ciências para o horizonte de 100 anos, combinado com preia-mar de águas vivas extrema e com sobrelevação meteorológica (cenário ModFc2100_PMmaxSM na Tabela 2). Deve comparar-se estas figuras com as figuras A2.2.1-A2.2.3 para avaliar a redução da extensão da zona de perigosidade extrema.



As diferenças principais ocorrem na profundidade do escoamento. Verifica-se que apenas em Algés a profundidade ultrapassa os 9 m e, em geral, a onda regista alturas máximas cerca de 1 m inferiores às do cenário NOAA2100_PMmaxSM, o que é essencialmente explicável pelo facto de ser inferior o nível inicial no estuário do Tejo no cenário ModFc2100_PMmaxSM. A extensão da inundação não é substancialmente diferente nos cenários NOAA2100_PMmaxSM (Fig. A2.2.1) e ModFc2100_PMmaxSM (Fig. A2.2.4). A diferença de alturas do escoamento traduz-se numa redução da área de perigosidade extrema. Esta redução é facilmente observável na Avenida de Ceuta (Alcântara), na Baixa Pombalina e, de forma particularmente evidente, na zona do Parque das Nações. Pode registar-se, todavia, inundação da ETAR de Beirolos.

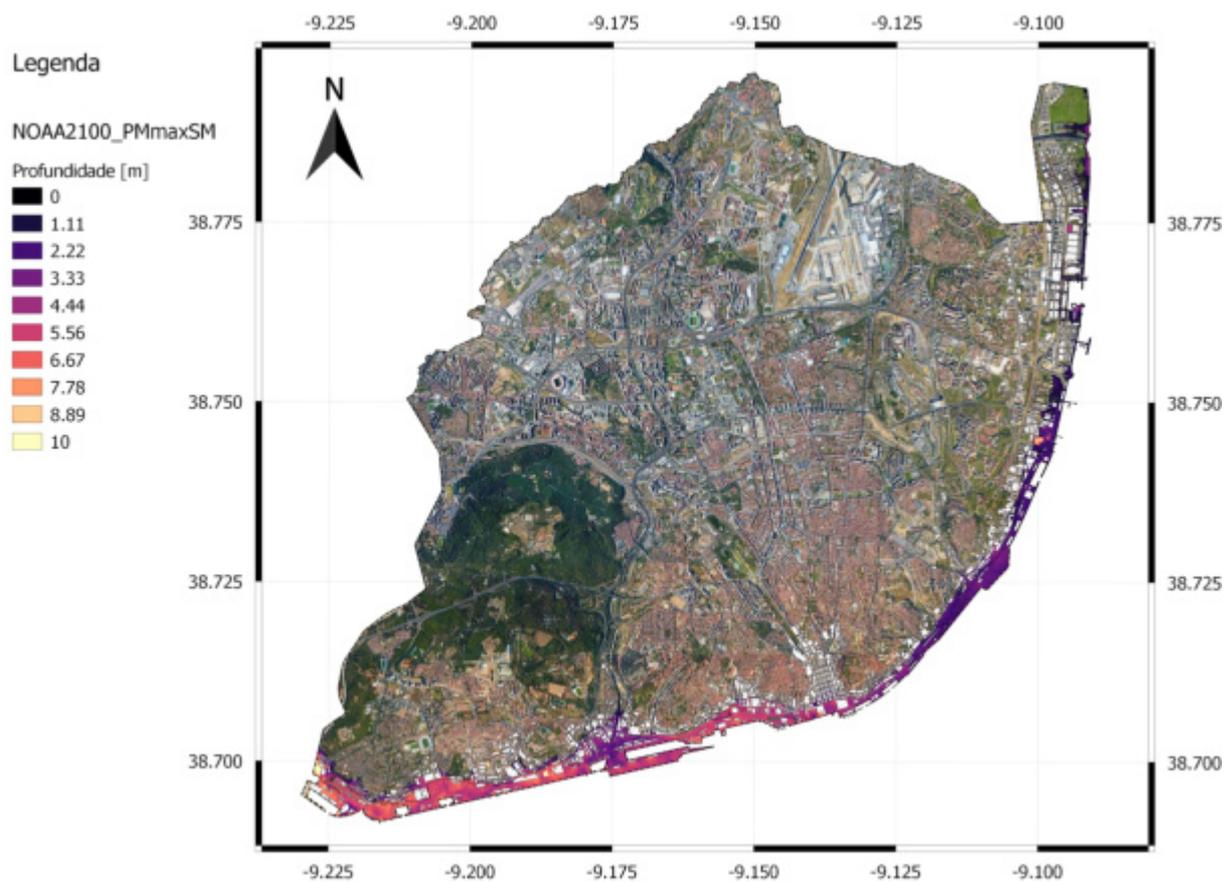


Figura A2.2.5 - Profundidade da inundação. Cenário ModFc2100_PmmaxSM.

ModFc2050_PmmaxSM

Nas figuras A2.2.6 e A2.2.7 mostram-se os resultados da simulação para o cenário ModFc2050_PMmaxSM (Tabela 2) - subida do nível do mar da previsto pelos modelos da Faculdade de Ciências para o horizonte de 50 anos, combinado com preia-mar de águas vivas extrema e com sobrelevação meteorológica.

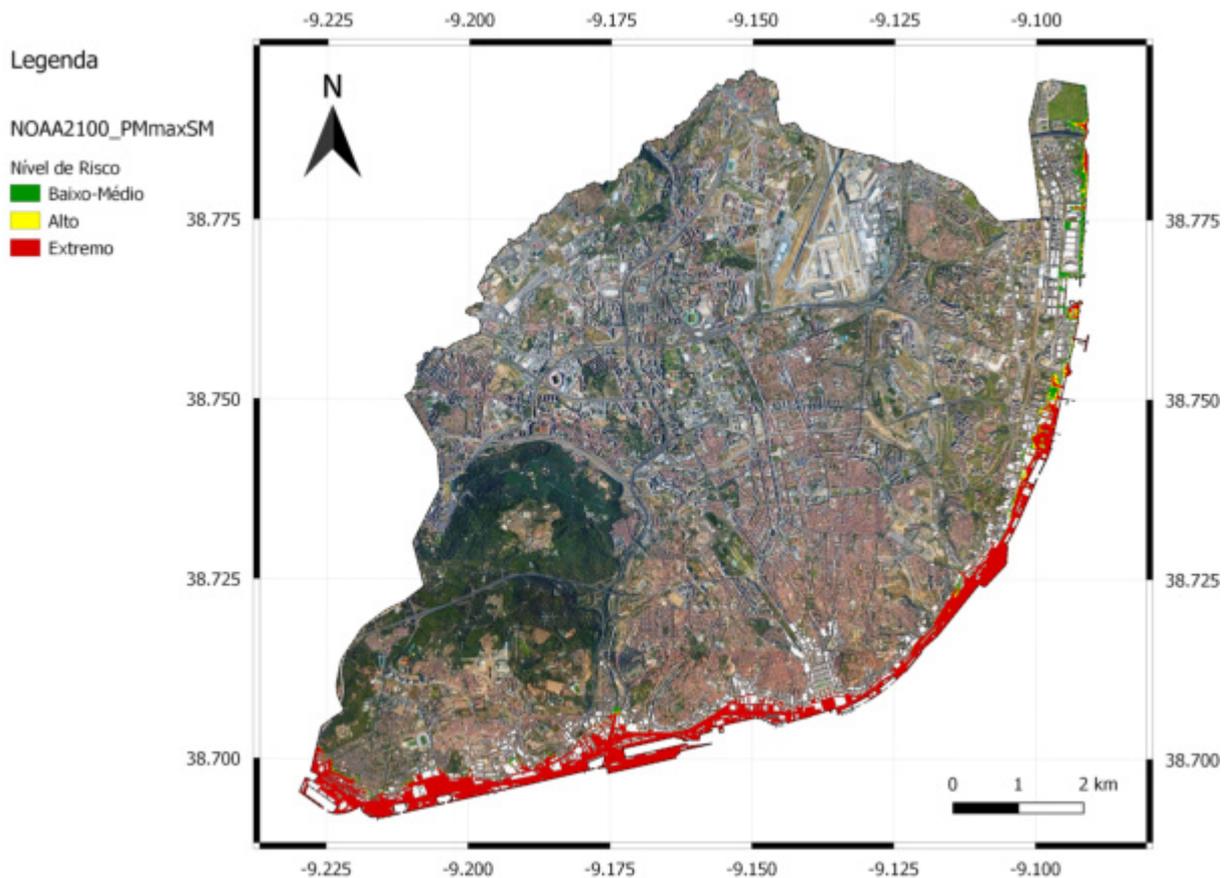
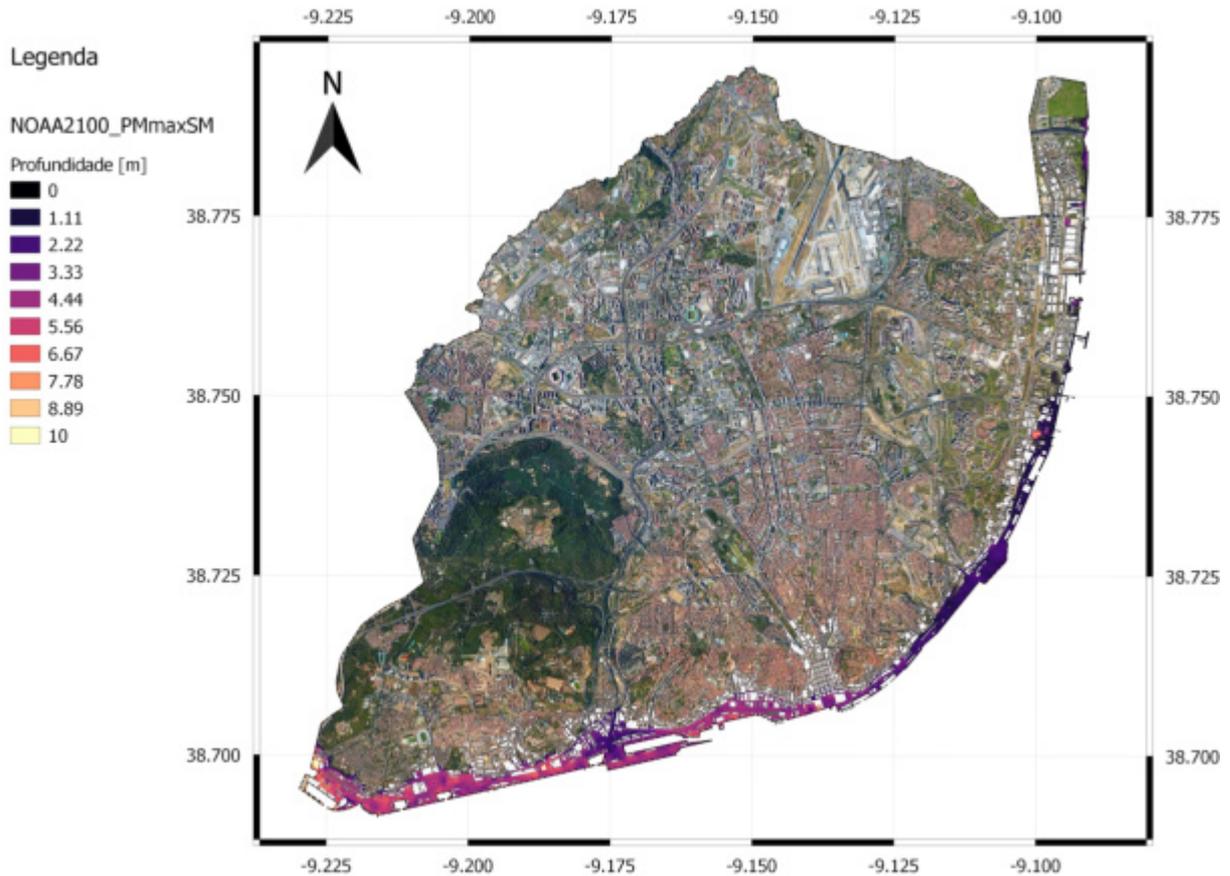


Figura A2.2.6 - Índice de perigosidade. Cenário ModFc2050_PmmaxSM.

Para este horizonte temporal, os níveis iniciais no estuário são cerca de 1 m inferiores aos do cenário ModFc2100_PMmaxSM (ver Tabela 2 e Fig. 5 – Níveis de superfície livre em Preia-Mar (esquerda) e Baixa-Mar (direita) (mínimo: verde – máximo: vermelho)). Esta condição inicial traduz-se menores profundidades máximas da inundação (Fig. A2.2.7) e menor área inundada (Fig. A2.2.6). Na zona de Algés registam-se ainda profundidades de cerca de 9 m; no resto da zona ribeirinha oeste não se registam profundidades superiores a 7 m em qualquer local. A redução da extensão da inundação é particularmente visível em Alcântara e no Parque das Nações. Em Alcântara a inundação atinge a estação ferroviária de Alcântara-Terra; no Parque das Nações regista-se perigosidade extrema na zona do Oceanário. A extensão da inundação no Parque das Nações é muito limitada e associada a profundidades baixas.



ModFc2050_BMAV

Nas figuras A2.2.8 e A2.2.9 mostram-se os resultados da simulação para o cenário ModFc2050_BMAV (Tabela 1) - subida do nível do mar da previsto pelos modelos da Faculdade de Ciências para o horizonte de 50 anos, combinado com baixa-mar de águas vivas e sem sobrelevação meteorológica. Este é o cenário da Tabela 1 comparativamente menos gravoso.

Verifica-se uma redução generalizada da área de inundação (Fig. A2.2.8). Não há perigosidade extrema a norte da Estação de Santa Apolónia (excepto numa zona limitada do Cais de Xabregas. As profundidades de inundação atingem máximos de 4.5 m em Algés mas são raros os pontos em que tomam valores superiores a 3 m (Fig. A2.2.9) até à Baixa Pombalina. A norte desta zona as profundidades são, em geral, menores que 1.5 m até Xabregas. A norte de Xabregas não se verifica inundação relevante.

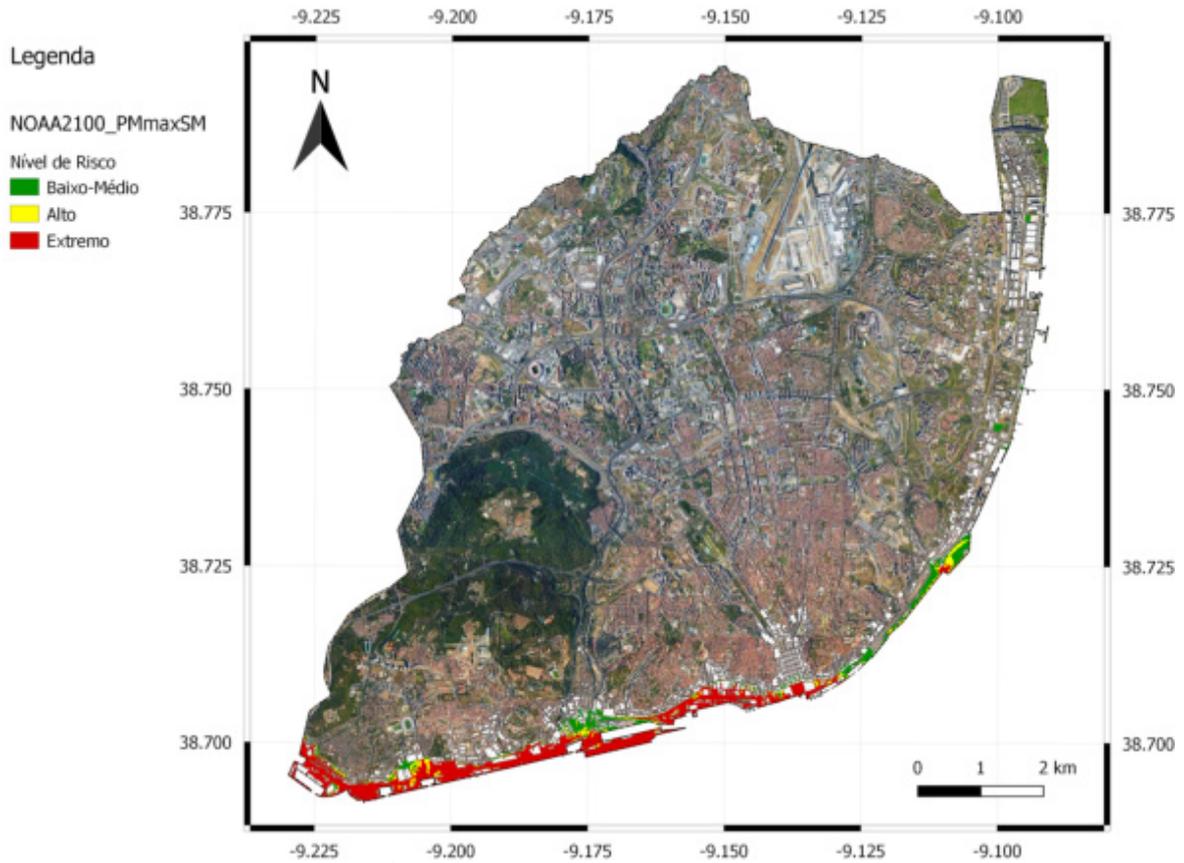


Figura A2.2.8 - Índice de perigosidade. Cenário ModFc2050_BMAV.

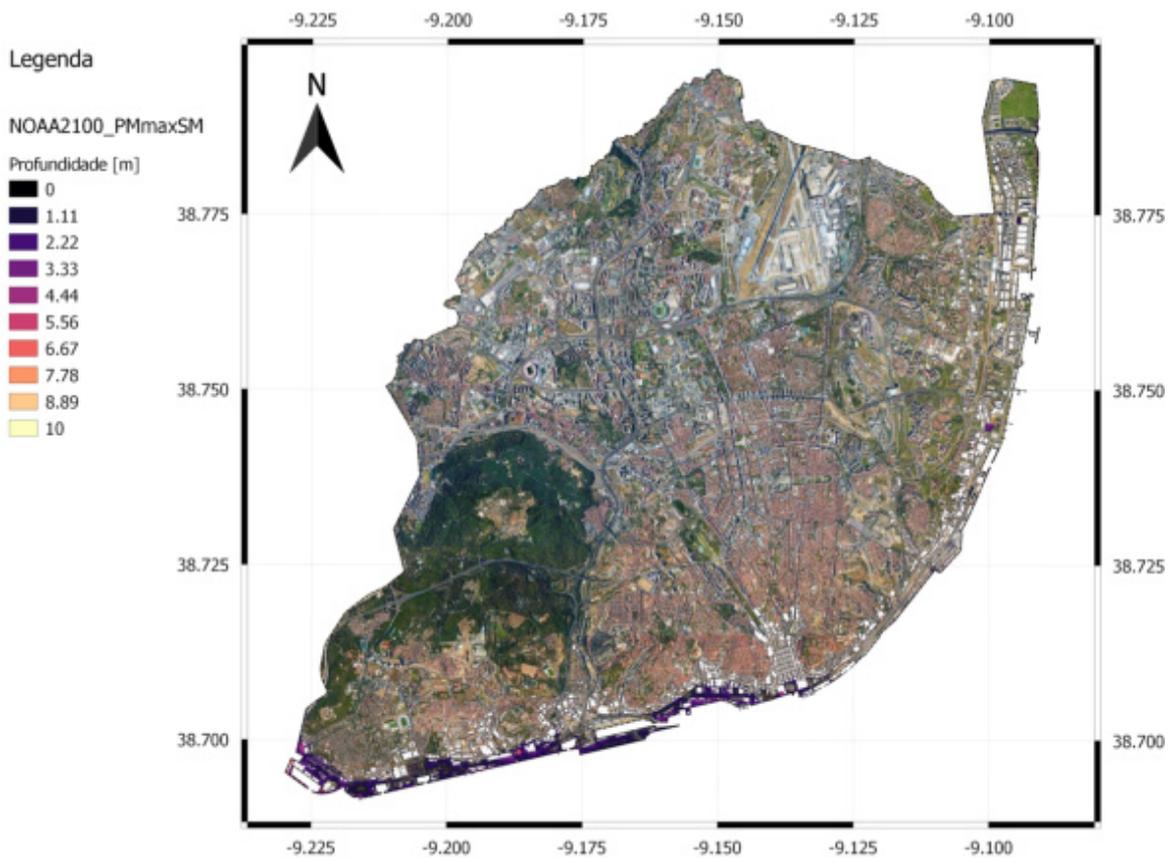


Figura A2.2.9 - Profundidade da inundação. Cenário ModFc2050_BMAV.

Os resultados das simulações de alta resolução espacial para os restantes cenários podem ser consultados a pedido. São menos gravosos que os apresentados nos capítulos anteriores.

A3 Método probabilístico de cálculo da perigosidade de tsunami (IPMA)

Neste projeto foi usada uma abordagem estocástica de árvore de eventos (Omira et al, 2016, Fig. A3) que integra modelos de probabilidade da fonte sísmica, modelação numérica de alta resolução de tsunamis, e métodos estatísticos para derivar a probabilidade de ocorrência de tsunami e excedência de um limiar de inundação por tsunami para dadas exposições. O método também leva em consideração o tratamento estatístico das incertezas relacionadas com a origem do tsunami, do nível do mar e da maré, incluindo efeitos meteorológicos.

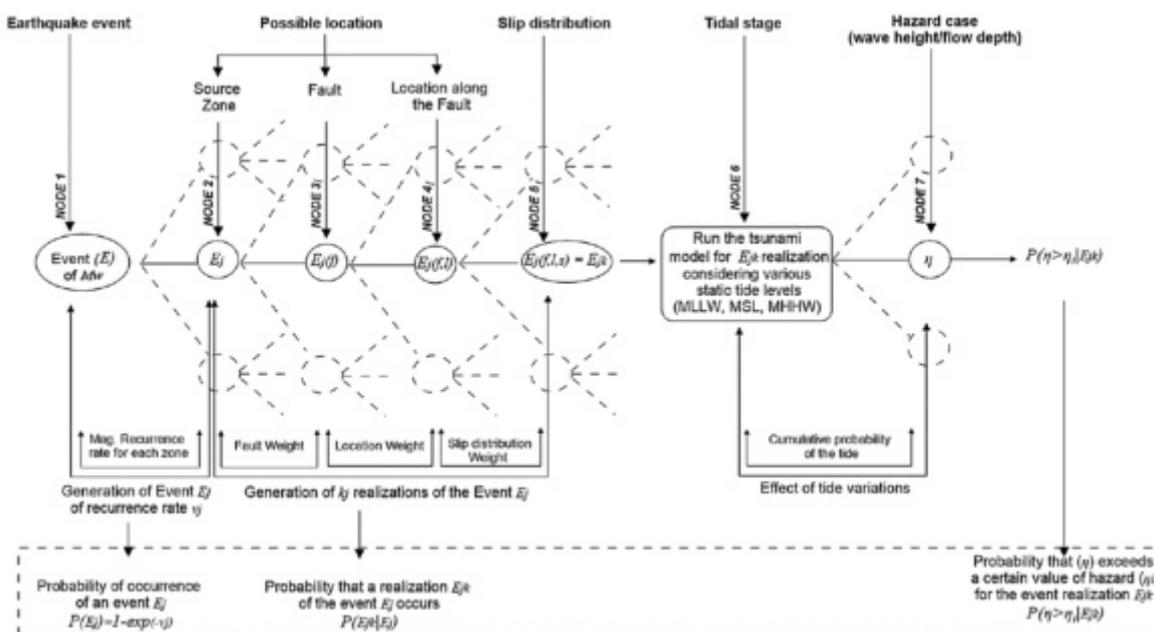


Figura A3 - Esquema da abordagem estocástica de árvore de eventos (Omira et al., 2016).

A4 Avaliação da consistência dos modelos de simulação (IST e IPMA)

Foi avaliada a consistência dos modelos de simulação de tsunami usados pelo IPMA e pelo IST tendo em consideração as mesmas condições iniciais. A figura A4.1 apresenta a área de inundação sem edificado para o pior cenário de tsunami e considerando o nível do mar mais gravoso. Este resultado foi obtido usando o modelo numérico do IST e mostra uma grande compatibilidade com o resultado obtido pelo IPMA, apresentado na figura 10.

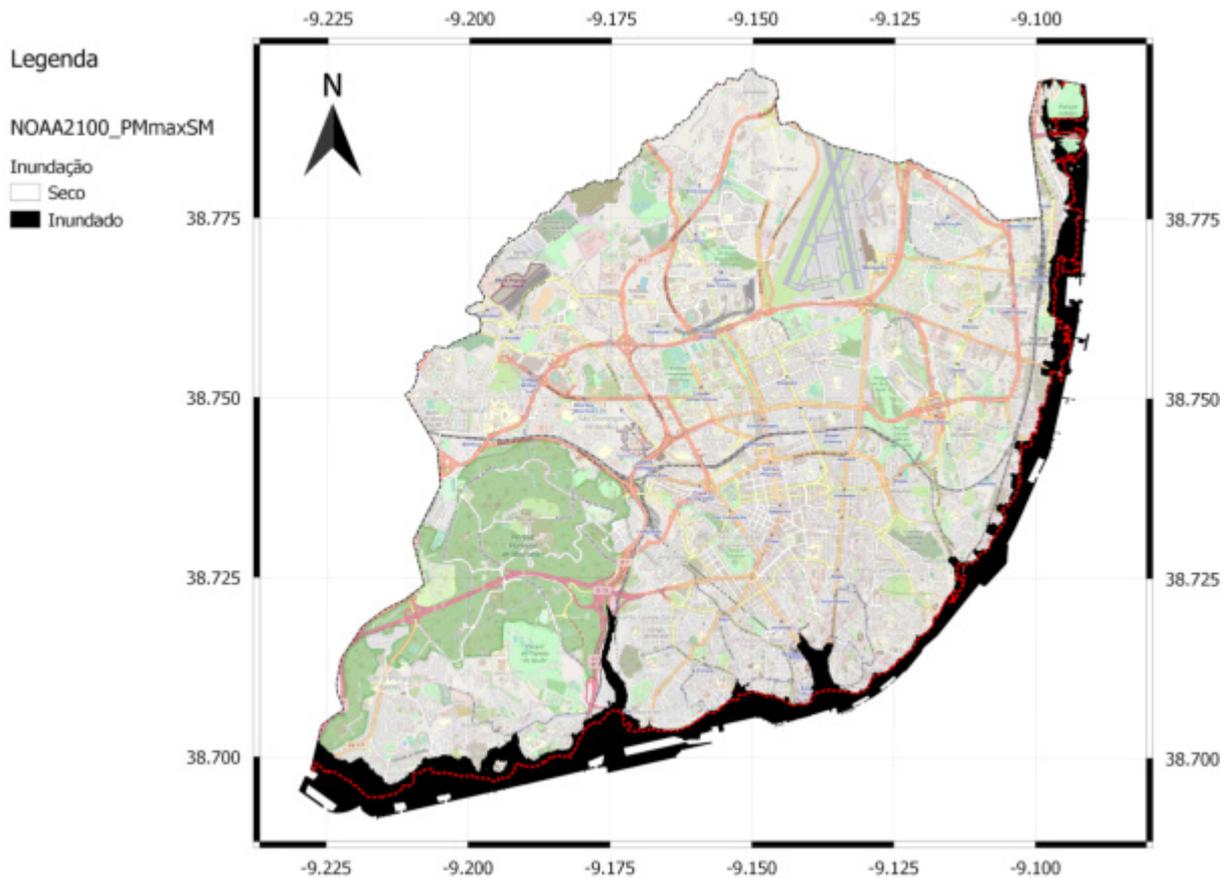


Figura A4.1 - Extensão inundação sem edificado 2100 NOAA + PMMax.

Anexo B: Base de dados dos cenários tsunamigénicos usados (IPMA)

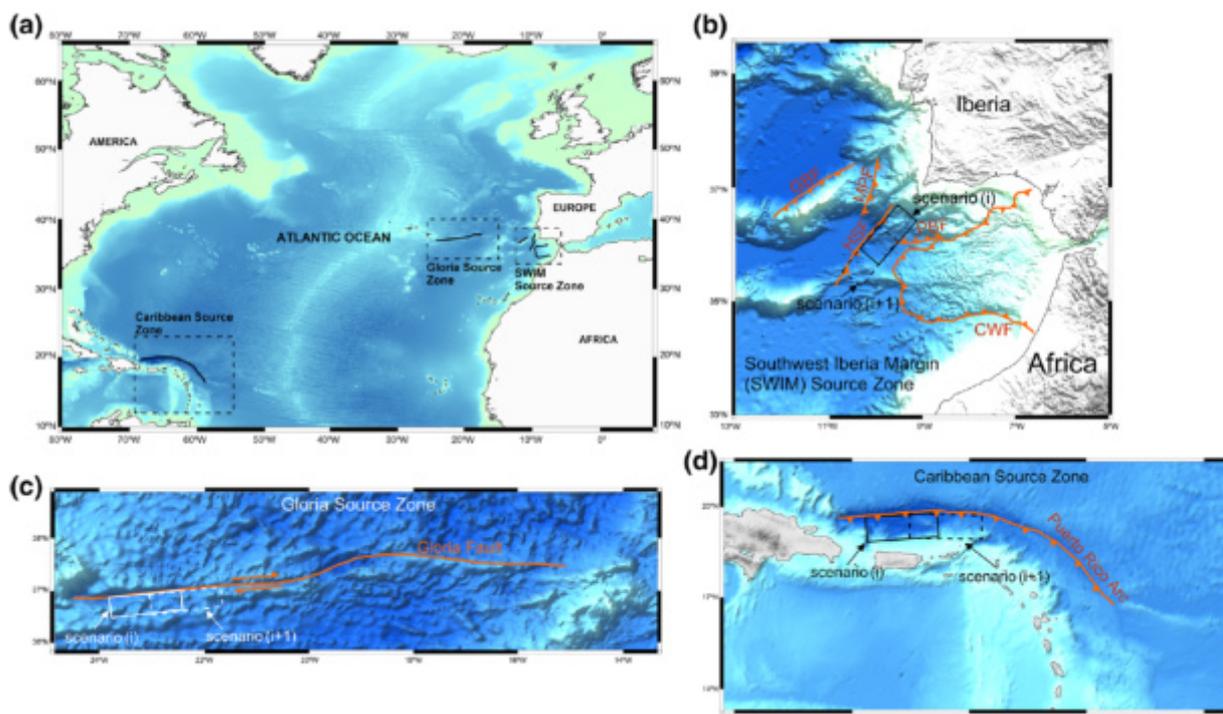


Figura B1 - a) Zonas tsunamigénicas; b) múltiplos cenários de tsunami considerados na zona do Sudoeste da Margem Ibérica; c) múltiplos cenários de tsunami considerados na zona da Glória; d) múltiplos cenários de tsunami considerados na zona do Arco das Caraíbas (Omira et al., 2016).

Tabela B1 - Base de dados para o Sudoeste da Margem Ibérica (SWIM)

M _w	Cenário	Limites dos segmentos das falhas	L x W (km)	Dip (°)	Slip (m)	Rake (°)	Depth to the top (km)	mu (e+10 Pa)
8.0	CW_S#1	-8.995 35.291 -9.162 36.002	100x80	5	4	90	5	3.0
	CW_S#2	-8.883 34.816 -9.092 35.701	100x80	5	4	90	5	3.0
	CW_S#3	-8.821 34.562 -8.995 35.291	100x80	5	4	90	5	3.0
	PB_S#1	-8.112 36.139 -8.997 36.095	80x60	25	6	90	5	4.5
	HS_S#1	-10.286 35.91 -9.681 36.455	80x60	35	6	90	5	4.5
	HS_S#2	-10.561 35.636 -9.977 36.175	80x60	35	6	90	5	4.5
	HS_S#3	-10.899 35.369 -10.286 35.912	80x60	35	6	90	5	4.5
	MP_S#1	-10.362 36.322 -10.066 37.005	80x60	35	6	90	5	4.5
	GB_S#1	-11.441 36.876 -10.740 37.326	80x60	35	6	90	5	4.5
	GB_S#2	-11.807 36.644 -11.103 37.092	80x60	35	6	90	5	4.5
GB_S#3	-12.147 36.429 -11.442 36.876	80x60	35	6	90	5	4.5	
8.25	CW_S#1	-8.910 34.944 -9.162 36.002	120x100	5	5	90	5	3.0
	CW_S#2	-8.821 34.569 -9.069 35.595	120x100	5	5	90	5	3.0
	PB_S#1	-7.947 36.146 -9.228 36.083	115x60	25	8.5	90	5	4.5
	HS_S#1	-10.527 35.674 -9.681 36.455	110x70	35	8.5	90	5	4.5
	HS_S#2	-10.899 35.369 -10.043 36.123	110x70	35	8.5	90	5	4.5
	MP_S#1	-10.424 36.184	110x70	35	8.5	90	5	4.5

INUNDAÇÃO POR TSUNAMI NA CIDADE DE LISBOA

		-10.018 37.117						
	GB_S#1	-11.807 36.644 -10.740 37.326	120x60	35	8.5	90	5	4.5
	GB_S#2	-12.147 36.429 -11.103 37.092	120x60	35	8.5	90	5	4.5
8.50	CW_S#1	-8.8251 34.568 -9.165 36.0018	160x160	5	10	90	5	3.0
	HS_S#1	-10.989 35.384 -9.685 36.542	170x90	35	10	90	5	4.5
	GB_S#1	-12.321 36.305 -10.565 37.428	200x60	35	12	90	5	4.5
	PB&MP	PB: -7.947 36.146 -9.228 36.083 MP: -10.424 36.184 -10.018 37.117	115x60 120x80	25	9.5 12	90	5	4.5
8.75	CW_S#1	-8.821 34.562 -9.165 36.002	170x200	5	16	90	5	3.0
	MP&HS	MP: -10.424 36.184 -10.018 37.117 HS: -10.989 35.384 -9.685 36.542	120x80 175x100	35	12 14	90	5	4.5

Tabela B2 - Base de dados para a zona da Glória

M _w	Cenário	Limites dos segmentos das falhas	L x W (km)	Dip (°)	Slip (m)	Rake (°)	Depth to the top (km)	mu (e+10 Pa)
8.0	Sce#1	-24.606 36.860 -22.326 37.011	200x25	85	5.0	160	1.0	5.0
	Sce#2	-23.458 36.941 -21.148 37.115	200x25	85	5.0	160	1.0	5.0
	Sce#3	-22.326 37.011 -20.109 37.185	200x25	85	5.0	160	1.0	5.0
	Sce#4	-21.147 37.111 -20.109 37.185 -18.988 37.471	200x25	85	5.0	160	1.0	5.0
	Sce#5	-20.109 37.185 -17.949 37.749	200x25	85	5.0	160	1.0	5.0
	Sce#6	-18.988 37.471 -17.949 37.749 -16.802 37.552	200x25	85	5.0	160	1.0	5.0
	Sce#7	-17.949 37.749 -15.670 37.354	200x25	85	5.0	160	1.0	5.0
	Sce#8	-16.802 37.552 -15.670 37.354 -14.755 36.960	200x25	85	5.0	160	1.0	5.0
8.25	Sce#1	-24.606 36.860 -21.148 37.115	300x25	85	7.5	160	1.0	5.0
	Sce#2	-23.458 36.941 -20.109 37.185	300x25	85	7.5	160	1.0	5.0
	Sce#3	-22.326 37.011 -20.109 37.185 -18.988 37.471	300x25	85	7.5	160	1.0	5.0
	Sce#4	-21.148 37.115 -20.109 37.185 -17.949 37.749	300x25	85	7.5	160	1.0	5.0
	Sce#5	-20.109 37.185 -17.949 37.749 -16.802 37.552	300x25	85	7.5	160	1.0	5.0
	Sce#6	-18.988 37.471 -17.949 37.749 -15.670 37.354	300x25	85	7.5	160	1.0	5.0
	Sce#7	-17.949 37.749 -15.670 37.354 -14.755 36.960	300x25	85	7.5	160	1.0	5.0
8.5	Sce#1	-24.606 36.860 -20.109 37.185	400x30	85	11	160	1.0	5.0
	Sce#2	-23.458 36.941 -20.109 37.185 -18.988 37.471	400x30	85	11	160	1.0	5.0
	Sce#3	-22.326 37.011 -20.109 37.185 -17.949 37.749	400x30	85	11	160	1.0	5.0
	Sce#4	-21.148 37.115 -20.109 37.185 -17.949 37.749 -16.802 37.552	400x30	85	11	160	1.0	5.0
	Sce#5	-20.109 37.185 -17.949 37.749 -15.670 37.354	400x30	85	11	160	1.0	5.0

INUNDAÇÃO POR TSUNAMI NA CIDADE DE LISBOA

	Sce#6	-18.988 37.471 -17.949 37.749 -15.670 37.354 -14.755 36.960	400x30	85	11	160	1.0	5.0
8.75	Sce#1	-24.606 36.860 -20.109 37.185 -17.949 37.749	600x40	85	13	160	1.0	5.0
	Sce#2	-23.458 36.941 -20.109 37.185 -17.949 37.749 -16.802 37.552	600x40	85	13	160	1.0	5.0
	Sce#3	-22.326 37.011 -20.109 37.185 -17.949 37.749 -15.670 37.354	600x40	85		160	1.0	5.0
	Sce#4	-21.148 37.115 -20.109 37.185 -17.949 37.749 -15.670 37.354 -14.755 36.960	600x40	85	13	160	1.0	5.0
9.0	Sce#1	-24.606 36.860 -20.109 37.185 -17.949 37.749 -15.670 37.354 -14.755 36.960	900x45	85	15	160	1.0	5.0

Tabela B3 - Base de dados para a zona das Caraíbas

M _w	Cenário	Limites dos segmentos das falhas	L x W (km)	Dip (°)	Slip (m)	Rake (°)	Depth to the top (km)	mu (e+10 Pa)
8.0	Sce#1	-68.6372374 19.6283279 -67.0468937 19.7916073	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#2	-67.7888617 19.6872651 -66.3050045 19.8609537	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#3	-67.0468937 19.7916073 -65.6249394 19.9548867	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#4	-66.3050045 19.8609537 -65.6249394 19.9548867 -64.8697985 19.8802525	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#5	-65.6249394 19.9548867 -64.2778249 19.8064509	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#6	-64.8697985 19.8802525 -63.6778477 19.7451613	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#7	-64.2778249 19.8064509 -63.0242599 19.6877023	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#8	-63.6778477 19.7451613 -63.0242599 19.6877023 -62.3642692 19.397784	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#9	-63.0242599 19.6877023 -61.8455346 19.1533333	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#10	-62.3642692 19.397784 -61.2696206 18.8960168	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#11	-61.8455346 19.1533333 -60.6480994 18.6041208	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#12	-61.2696206 18.8960168 -60.6480994 18.6041208 -60.1506463 18.1433661	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#13	-60.6480994 18.6041208 -59.7874429 17.6838188	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#14	-60.1506463 18.1433661 -59.3722295 17.2556241	150x50	15	5	90	5.0	3.0
	Sce#15	-59.7874429 17.6838188 -58.9642062 16.7932039	150x50	15	5	90	5.0	3.0
8.25	Sce#1	-68.6372374 19.6283279 -65.6249394 19.9548867	300x50	15	6	90	5.0	3.0
	Sce#2	-67.0468937 19.7916073 -65.6249394 19.9548867 -64.2778249 19.8064509	300x50	15	6	90	5.0	3.0
	Sce#3	-65.6249394 19.9548867 -63.0242599 19.6877023	300x50	15	6	90	5.0	3.0
	Sce#4	-64.2778249 19.8064509 -63.0242599 19.6877023 -61.8455346 19.1533333	300x50	15	6	90	5.0	3.0
	Sce#5	-63.0242599 19.6877023 -60.6480994 18.6041208	300x50	15	6	90	5.0	3.0

INUNDAÇÃO POR TSUNAMI NA CIDADE DE LISBOA

	Sce#6	-61.8455346 19.1533333 -60.6480994 18.6041208 -59.7874429 17.6838188	300x50	15	6	90	5.0	3.0
	Sce#7	-60.6480994 18.6041208 -58.9642062 16.7932039	300x50	15	6	90	5.0	3.0
8.50	Sce#1	-68.6372374 19.6283279 -65.6249394 19.9548867	300x100	15	8	90	5.0	3.0
	Sce#2	-67.0468937 19.7916073 -65.6249394 19.9548867 -64.2778249 19.8064509	300x100	15	8	90	5.0	3.0
	Sce#3	-65.6249394 19.9548867 -63.0242599 19.6877023	300x100	15	8	90	5.0	3.0
	Sce#4	-64.2778249 19.8064509 -63.0242599 19.6877023 -61.8455346 19.1533333	300x100	15	8	90	5.0	3.0
	Sce#5	-63.0242599 19.6877023 -60.6480994 18.6041208	300x100	15	8	90	5.0	3.0
	Sce#6	-61.8455346 19.1533333 -60.6480994 18.6041208 -59.7874429 17.6838188	300x100	15	8	90	5.0	3.0
	Sce#7	-60.6480994 18.6041208 -58.9642062 16.7932039	300x100	15	8	90	5.0	3.0

Anexo C: Taxas anuais de recorrência para cada valor de magnitude dentro das três zonas fonte consideradas

Tabela C1 - Frequências anuais para as zonas do Sudoeste da Margem Ibérica, Glória e das Caraíbas (Omira et al., 2015; Matias et al., 2013).

Fonte	Sudoeste da Margem Ibérica (SWIM)					
Mag.	Mw7.5	Mw7.75	Mw8.0	Mw8.25	Mw8.5	Mw8.75
An. Fr.	0.00464	0.00331	0.00239	0.00173	0.00126	0.00082
Fonte	Glória					
Mag.	Mw8.0	Mw8.25	Mw8.5	Mw8.75	Mw9.0	
An. Fr.	0.00321	0.00180	0.00101	0.000602	0.000261	
Fonte	Caraíbas					
Mag.	Mw8.0	Mw8.25	Mw8.5			
An. Fr.	0.0320	0.0227	0.0164			

INUNDAÇÃO POR TSUNAMI NA CIDADE DE LISBOA

Tabela C2 - Os valores de probabilidade atribuídos às falhas consideradas e às localizações dentro dessas falhas, considerando as diferentes magnitudes e zonas fonte. Os valores propostos são baseados na opinião de especialistas e podem diferir de um especialista para outro.

Mag.	Falha	Probabilidade relativa da falha	Comentário sobre a probabilidade da falha	Probabilidade relativa da localização	Comentário sobre a probabilidade da localização
Zona do SWIM					
8.00	GBF	1/5	Todas as falhas são igualmente prováveis	1/3	3 localizações da falha igualmente prováveis
	HSF	1/5		1/3	3 localizações da falha igualmente prováveis
	MPF	1/5		1/2	2 localizações da falha igualmente prováveis
	CWF	1/5		1/3	3 localizações da falha igualmente prováveis
	PBF	1/5		1/2	2 localizações da falha igualmente prováveis
8.25	GBF	1/5	Todas as falhas são igualmente prováveis	1/2	2 localizações da falha igualmente prováveis
	HSF	1/5		1/2	2 localizações da falha igualmente prováveis
	MPF	1/5		1	1 localização da falha
	CWF	1/5		1/2	2 localizações da falha igualmente prováveis
	PBF	1/5		1	1 localização da falha
8.50	GBF	4/15	A falha CWF tem 1/5 da probabilidade total	1	1 localização da falha
	HSF	4/15		1	1 localização da falha
	CWF	3/15		1	1 localização da falha
	MPF+PBF (evento composto)	4/15		1	1 localização da falha
8.75	MPF+PBF (evento composto)	4/5	A falha CWF tem 1/5 da probabilidade total	1	1 localização da falha
	CWF	1/5		1	1 localização da falha
Zona da Glória					
8.00	Falha da Glória	1	Uma falha para todas as magnitudes consideradas	1/9	9 localizações da falha igualmente prováveis
8.25	Falha da Glória	1		1/7	7 localizações da falha igualmente prováveis
8.50	Falha da Glória	1		1/7	7 localizações da falha igualmente prováveis
8.75	Falha da Glória	1		1/4	4 localizações da falha igualmente prováveis
9.00	Falha da Glória	1		1	1 localização da falha
Zona das Caraíbas					
8.00	Arco de Porto Rico	1	Uma falha para todas as magnitudes consideradas	1/15	15 localizações da falha igualmente prováveis
8.25	Arco de Porto Rico	1		1/7	7 localizações da falha igualmente prováveis
8.50	Arco de Porto Rico	1		1/7	7 localizações da falha igualmente prováveis