

Risco de tsunami em Lagos – Rotas de evacuação

Tsunami risk in Lagos – Evacuation routes

André Trindade⁽¹⁾, Cristina Catita^(1,2), Rachid Omira⁽³⁾, Maria Ana Baptista^(2,4) e Paula Teves-Costa^(1,2,5)

⁽¹⁾ FCUL - DEGGE, Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C8, 1749-016 Lisboa, andretrindade@yahoo.com

⁽²⁾ IDL - Instituto Dom Luiz, Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C8, 1749-016 Lisboa, cmcatita@fc.ul.pt

⁽³⁾ IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Rua C do Aeroporto, 1749-077 Lisboa, Rachid.omira@ipma.pt

⁽⁴⁾ ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, mavbaptista@gmail.com

⁽⁵⁾ CERU – Centro Europeu de Riscos Urbanos, Av. Elias Garcia 7 – 2º, 1000-146 Lisboa, ptcosta@fc.ul.pt

SUMMARY

The Algarve coast, namely the city of Lagos, has historically been affected by devastating natural hazards including earthquakes and tsunamis. It becomes imperative to study the vulnerability, as well as finding ways to increase the level of resilience and adaptive capacity of populations. Risk assessment is a multidisciplinary area, and generally should have a spatial representation in map form achieved using GIS tools. This paper as part of an interdisciplinary research project, aims to develop in a GIS environment, evacuation routes and locations of shelters in case of tsunami in order to increase the resilience level mitigating the tsunami risk. The results in form of maps should be useful for decision makers and local authorities in the planning and management of emergency situations.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projecto VULRESADA, coordenado pelo Centro Europeu de Riscos Urbanos (CERU), tem estado a ser realizado um estudo sobre a redução das vulnerabilidades em Lagos, face ao risco sísmico e de tsunami. Após uma primeira fase de identificação da perigosidade sísmica e da elaboração de cenários de tsunami, realizaram-se vários estudos sobre a vulnerabilidade da população, a vulnerabilidade do edificado e medidas para minimizar o risco e aumentar a resiliência da população.

Apresenta-se neste trabalho uma síntese do estudo desenvolvido numa tese de mestrado, onde se elaboraram rotas de evacuação e a identificação de locais seguros para a população no caso da ocorrência de tsunami.

O território de Portugal continental revela uma elevada susceptibilidade à ocorrência de sismos e tsunamis, tanto pela sua localização junto uma margem continental de orientação norte-sul, relacionada com a abertura do Atlântico Norte, como pela sua proximidade e posição relativamente à Zona de Fractura Açores-Gibraltar, (limite entre as placas litosféricas Euroasiática e Africana). Esta região foi designada por AT2- “Atlantic” no catálogo *Genesis and Impact of Tsunamis on the European Coasts* (GITEC) e estende-se dos Açores ao estreito de Gibraltar, (Baptista, 1998; Baptista & Miranda, 2009).

Nesta região definiram-se zonas de geração de grandes sismos e tsunamis que afectam a faixa costeira portuguesa. A secção central da Zona de Fractura dos Açores-Gibraltar (ZFAG) é constituída pela zona de fractura Falha da Glória na qual já foram relatados dois sismos tsunamigénicos (25 de Novembro de 1941 e 26 de Maio de 1975) de amplitude máxima em Lagos. O Banco de Gorringe é a região leste da ZGAF situado entre a planície Abissal do Tejo a Norte e a planície Abissal de Ferradura a Sul. Fora encontradas na documentação histórica, referências ao tsunami do ano de 60 a.c. gerado por um sismo com epicentro provável nesta zona, outro no ano de 382 d.c. que gerou um tsunami observado ao largo do cabo de S. Vicente, um tsunami a 24 de agosto de 1356 e por último um sismo que também gerou o tsunami de amplitude reduzida de 28 de fevereiro de 1669.

A Margem Sudoeste Ibérica localiza-se ao longo da costa Sul do Algarve estendendo-se para leste até Gibraltar. A Falha do Banco de Portimão está incluída nesta zona que possui sismicidade frequente. A Zona do Prisma Acreccionário de Gibraltar-Alboran inclui a falha do Golfo de Cadiz, que actualmente aparenta estar inactiva. A Zona das falhas de Ferradura e Marquês de Pombal que

se situa entre a zona do Banco de Gorringe e as zonas Sul algarvia e o Prisma acreccionário de Gibraltar-Alboran, é considerada como a fonte mais provável do evento de 1755. A zona SWIT (*SouthWest Iberian Transpressive Domain*) é composta por um conjunto de falhas de desligamento, que se estendem entre a falha da Glória e NW de Marrocos. A SWIT engloba como sub-regiões as zonas do Banco de Gorringe, de Ferradura/Marquês de Pombal, do Sul do Algarve e de Alboran-Gibraltar (figura 1).

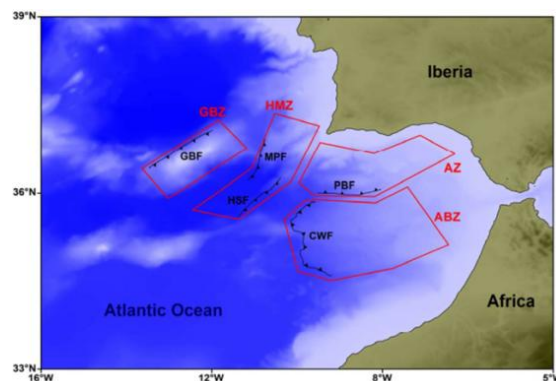


Figura 1 – Potenciais zonas tsunamigénicas a sudoeste da Ibéria e principais falhas. GBZ: Zona do Banco de Gorringe; HMZ: Zona de Ferradura/Marquês de Pombal; AZ: Zona Sul do Algarve; ABZ: Prisma acreccionário de Gibraltar-Alboran; GBF: Falha do Banco de Gorringe; MPF: Falha de Marquês de Pombal; HSF: Falha de Ferradura; PBF: Falha do Banco de Portimão; e a CWF: Falha do Golfo de Cadiz. Fonte: Omira et al. (2009b).

(Potential tsunamigenic areas in southwest Iberia and main faults. Source: Omira et al., 2009.)

O problema da localização de Portugal na proximidade de fontes sismogénicas e tsunamigénicas vai entroncar-se com outro problema que consiste na forte urbanização da faixa costeira do país. A cidade de Lagos pode ser considerada uma *Natural Hazard Area* como o demonstram os estudos geotectónicos e a sua história sísmica e tectónica.

A vulnerabilidade a tsunami exprime a capacidade que determinado elemento tem para resistir ou ser afectado pelo evento geofísico, sendo condicionada pela acção do sismo de determinada severidade. A estratégia de evacuação pode ser encarada como etapa da gestão do risco tanto numa fase de preparação, aumentando a capacidade de resposta e consequentemente a resiliência da população e na fase de resposta associada ao domínio da gestão da emergência. Enquanto a fase de preparação passa

principalmente pela antecipação do desastre, a gestão de emergência possui um carácter reactivo, de resposta imediata ao evento danoso.

Com este trabalho procurou-se conhecer a vulnerabilidade tanto do edificado como da população e, a partir destas, com recurso a ferramentas SIG, delinear uma rede de rotas de evacuação e localizar locais seguros de abrigo.

2. TRATAMENTO E PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS

A informação alfanumérica sobre as características do edificado/alojamento e população foi extraída da base de dados dos Censos 2011 disponibilizada pelo INE (Instituto Nacional de Estatística). A informação cartográfica (dados vectoriais georreferenciados) foram extraídos da Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) na sua versão actual de 2013 (formato *shapefile*) e das cartas em Modelo Numérico Topo-Cartográfico (MNTC) 1: 2 000 (formato *dgn*) fornecidas pela AMAL (Associação de Municípios do Algarve). O maior nível de desagregação possível dos dados provenientes dos Censos é a subsecção estatística, o qual foi adoptado como unidade territorial de trabalho.

A área de estudo seleccionada para este trabalho não se restringe somente ao centro histórico da cidade de Lagos, mas abrange também as faixas litorais (Baía de Lagos) das antigas freguesias de São Sebastião e Santa Maria, actual União das freguesias de Lagos até à Meia Praia (figura 2). Esta escolha deve-se ao âmbito do estudo, não só da vulnerabilidade mas também da evacuação, o que implica a acção sobre uma área afectada pelo perigo de tsunami assim como o conhecimento das outras áreas adjacentes que sejam seguras e apropriadas (ou não) para a evacuação.



Figura 2 - Mapa de enquadramento da área de estudo.
(*Framework map of the study area.*)

Os dados relativos às áreas afectadas por tsunami foram fornecidos sob a forma de grelhas de simulação de inundação por tsunami facultadas pelo Instituto Dom Luiz (IDL-UL). Estas grelhas foram geradas utilizando o modelo COMCOT-Lx (Cornell Multigrid Coupled Tsunami Model) (Omira et al., 2009b) que inclui a resolução das equações da hidrodinâmica nomeadamente a NLSW (*Non Linear Shallow Water*) e os cálculos do *run-up* (espraiamento), do *run-in* (máxima distância de inundação), da área inundada e da velocidades do fluxo em terra. Estas simulações necessitaram de DTM's (Modelos Digitais de Terreno) topobatimétricos de alta resolução (10m) mas as grelhas resultantes foram sujeitas a uma generalização para uma resolução de 50m. O pré-processamento aplicado a estas grelhas que abrangem toda a região do Algarve consistiu na atribuição do sistema de coordenadas definido para todo o projecto (ETRS – 1989 TM06-

Portugal) e pela aplicação de uma máscara correspondente ao limite administrativo do concelho de Lagos.

Toda esta informação foi agregada numa nova base de dados geográfica na qual as subsecções estatísticas da área de estudo (da base cartográfica da CAOP) acabaram por ser “povoadas” pelos atributos seleccionados das tabelas dos Censos 2011 e pelos valores de altura de onda das grelhas de simulação de inundação por tsunami. Os dados dos Censos 2011 foram agregados à CAOP pelo código da Base Geográfica de Referenciação de Informação (BGRI) do INE, comum às duas bases de dados. Os atributos dos Censos contabilizam o número de edifícios de cada subsecção estatística. Para que estes fossem classificados segundo os parâmetros necessários para a estimação da vulnerabilidade (material de construção, época de construção e número de pisos) foram calculadas as percentagens de cada atributo relativamente ao total de edifícios da subsecção. A atribuição de determinada classe a cada área estatística obedeceu ao critério maioritário (percentagem superior a 55%) contudo, nem todas as subsecções respeitaram esta condição em relação a um ou mais parâmetros de classificação sendo então definidas como heterogéneas (cerca de 22%). Estas áreas heterogéneas foram posteriormente “homogenizadas”, uma a uma, reduzindo primeiro o critério maioritário para >50% e, no caso de permanecerem heterogéneas, considerando o atributo predominante de cada parâmetro e a classificação das áreas da vizinhança.

Para se integrar os valores de inundação na base de dados, desencadeou-se um processo de extracção e junção dos valores dos *pixels* das grelhas (em ambiente SIG) pela média em cada subsecção estatística da área de estudo. A resolução espacial das grelhas de inundação foi convertida para 10m para que todas as subsecções estatísticas interceptassem pelo menos um ponto central de um *pixel* das grelhas. O método de interpolação seleccionado foi o Kriging Ordinário, por apresentar o RMS (erro médio quadrático) mais baixo após terem sido testados vários métodos.

Das folhas da carta topo-cartográfica correspondentes à área de estudo foram extraídos os polígonos correspondentes aos edifícios e as linhas da rede de estradas necessárias para a modelação da evacuação.

3. METODOLOGIA

3.1 VULNERABILIDADE DO EDIFICADO

A estimação de um índice de vulnerabilidade referente ao edificado (parque habitacional) teve por base a adaptação da metodologia RISK-UE adoptada em Barreira et al. (2010) para a vulnerabilidade sísmica das estruturas, combinada com a metodologia BTV (*building tsunami vulnerability*) Batista et al. (2006) que já introduz na estimação dados de modelos de inundação. Esta metodologia desenvolveu-se em quatro etapas, a primeira de classificação tipológica do edificado, a segunda de caracterização das classes tipológicas segundo um índice de vulnerabilidade estrutural, a terceira de integração dos valores de altura de onda das áreas inundadas e por fim a quarta de estimação do índice de vulnerabilidade a tsunami.

Após o pré-processamento dos dados dos censos descritos no ponto anterior, nomeadamente a homogenização das subsecções estatísticas, procedeu-se à sua efectiva classificação segundo os três parâmetros mencionados. O parâmetro “material de construção” foi dividido em três classes maioritárias, alvenaria com placa, alvenaria sem placa e betão. A percentagem de edifícios de taipa/adobe e de outros materiais foi sempre residual ou inexistente em praticamente todas as subsecções e, por essa razão não constituíram classe. A época de construção foi agregada em 5 classes (antes de 1919; 1919-1960; 1961-1985; 1986-2000; 2001-2011). O número de pisos foi classificado segundo os atributos nativos da base de dados dos Censos 2011 sendo estes um ou dois pisos, três ou quatro pisos e cinco ou mais pisos.

Como referido em Barreira et al. (2010) a classificação que melhor se adequa para a aplicação do método RISK-UE baseia-se no par material de construção-idade, enquanto o número de pisos deve ser considerado como factor de agravamento ou desaggravamento do índice de vulnerabilidade. Seguindo este pressuposto resultaram 10 classes tipológicas, divididas em alvenaria (agregaram-se as classes de alvenaria com e sem placa, por estas últimas serem maioritárias em pequenas subsecções adjacentes às com placa) e betão para cada uma das classes de época de construção. Obteve-se assim a distribuição espacial para a área de estudo da classificação tipológica final.

A escala EMS-98 (Grünthal, 1998) descreve linguisticamente os diferentes graus de pertença de determinada tipologia em relação a uma classe de vulnerabilidade (tabela 1): Classe mais provável; Classe eventual; Classe improvável. Para a interpretação quantitativa destes termos linguísticos em Giovinazzi & Lagomarsino (2004) é aplicada a teoria dos conjuntos difusos (*Fuzzy Set Theory*) que discrimina esses limiares de vulnerabilidade de cada tipologia (tabela 2).

Tabela 1 - Correlação entre classes de vulnerabilidade e tipologia segundo EMS-98

Typologies	Building type	Vulnerability Classes					
		A	B	C	D	E	F
Masonry	M1 Rubble stone						
	M2 Adobe (earth bricks)						
	M3 Simple stone						
	M4 Massive stone						
	M5 Unreinforced M (old bricks)						
	M6 Unreinforced M with r.c. floors						
	M7 Reinforced or confined masonry						
Reinforced Concrete	RC1 Frame in r.c. (without E.R.D.)						
	RC2 Frame in r.c. (moderate E.R.D.)						
	RC3 Frame in r.c. (high E.R.D.)						
	RC4 Shear walls (without E.R.D.)						
	RC5 Shear walls (moderate E.R.D.)						
	RC6 Shear walls (high E.R.D.)						
Stell	S Steel structures						
Tiber	W Timber structures						

Situations: ■ Most probable class; ■ Possible class; ■ Unlikely class (exceptional cases)

Tabela 2 – Limiares numéricos do índice de vulnerabilidade de cada classe EMS-98

Typologies	Building type	vulnerability Classes				
		V_{Imin}	V_I^-	V_I^+	V_I^{++}	V_{Imax}
Masonry	M1 Rubble stone	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
	M2 Adobe (earth bricks)	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
	M3 Simple stone	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M4 Massive stone	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
	M5 Unreinforced M (old bricks)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M6 Unreinforced M with r.c. floors	0.3	0.49	0.616	0.79	0.86
	M7 Reinforced or confined masonry	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
Reinforced Concrete	RC1 Frame in r.c. (without E.R.D.)	0.3	0.49	0.644	0.8	1.02
	RC2 Frame in r.c. (moderate E.R.D.)	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
	RC3 Frame in r.c. (high E.R.D.)	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
	RC4 Shear walls (without E.R.D.)	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
	RC5 Shear walls (moderate E.R.D.)	0.14	0.21	0.384	0.51	0.7
	RC6 Shear walls (high E.R.D.)	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
Stell	S Steel structures	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
Tiber	W Timber structures	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

O índice de vulnerabilidade $\bar{V}_I$ é então dado pela expressão:

$$\bar{V}_I = V_I^* + \Delta V_R + \Delta V_m \quad (1)$$

Onde V_I^* é o valor médio do índice tipológico de vulnerabilidade; ΔV_R é o factor regional de vulnerabilidade (foi considerado 0,08) e ΔV_m são o conjunto de factores de agravamento e desaggravamento.

Como não foi realizado um levantamento de campo das características dos edifícios para poder identificar em concreto as classes EMS-98 presentes na área de estudo, utilizaram-se para o efeito os valores médios do índice das classes (par material-idade) calculados para Lisboa (Barreira et al., 2010). Nesse estudo existir apenas 8 classes, pelo que nem todas as classes tipológicas estabelecem correspondência directa, tendo-se aplicado nesses

casos específicos (Alvenaria85-00, Alvenaria01-11, Betão<1919, Betão85-00 e Betão01-11) um factor de desaggravamento referente ao estado de conservação de -0,04 em relação à classe anterior (excepto para a classe Betão<1919 à qual foi aplicado um factor de agravamento de 0,04).

As classes de número de pisos, como já referido, constituíram também um factor de modificação de comportamento (agravamento/desagravamento) aos quais foram atribuídos os valores expressos da tabela 3.

Tabela 3 - Factor de modificação de comportamento (agravamento/desagravamento) para classes de número de pisos

	Alvenaria	Betão
1 ou 2 pisos	-0,04	-0,02
3 ou 4 Pisos	0	0
5 ou mais Pisos	0,04	0,02

Foram então utilizados os seguintes valores de índice de vulnerabilidade médio para calcular $\bar{V}_I$ de cada classe tipológica (tabela 4).

Tabela 4 - Valores médios dos índices de vulnerabilidade para as tipologias de Alvenaria e Betão (adaptado de Barreira et al., 2010)

Classe Tipológica	Mínimo	Médio	Máximo
Alv<1919	0.531	0.773	1.016
Alv19_60	0.491	0.745	1.056
Alv61_85	0.491	0.700	0.956
Alv85_00	0.447	0.630	0.832
Alv01_11	-	0.616	-
Bet<1919	-	0.685	-
Bet19_60	0.522	0.681	0.742
Bet61_85	0.482	0.644	0.752
Bet85_00	0.458	0.551	0.658
Bet01_11	0.426	0.529	0.722

Após o calculo de $\bar{V}_I$ fez-se corresponder o resultado de cada subsecção estatística a uma classe de vulnerabilidade EMS-98 segundo os seguintes limiares tabulados em Giovinazzi & Lagomarsino (2004) (tabela 5). O dano esperado não foi estimado nesta fase do trabalho pois será posteriormente associado ao índice de vulnerabilidade a tsunami do edificado que envolve já cenários de inundação.

Tabela 5 – Valores do Índice de vulnerabilidade para as classes de vulnerabilidade. (Fonte: Giovinazzi & Lagomarsino, 2004)

	V_{Imin}^c	V_I^{c-}	V_I^{c+}	V_I^{c++}	V_{Imax}^c
A	1.02	0.94	0.9	0.86	0.78
B	0.86	0.78	0.74	0.7	0.62
C	0.7	0.62	0.58	0.54	0.46

	V_{Imin}^c	V_I^{c-}	V_I^{c+}	V_I^{c++}	V_{Imax}^c
D	0.54	0.46	0.42	0.38	0.3
E	0.38	0.3	0.26	0.22	0.14
F	0.22	0.14	0.1	0.06	-1.02

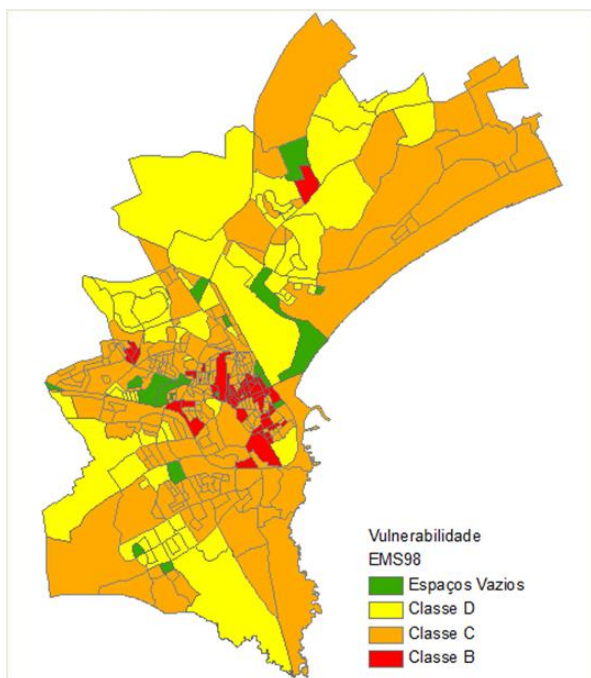


Figura 3 – Mapa de classificação da vulnerabilidade estrutural do edificado
(Structural vulnerability of the buildings classification map)

Das regiões tsunamigénicas já anteriormente referidas foram seleccionadas três como sendo suficientemente próximas e potencialmente geradoras de perigo de *tsunami*. Segundo o estudo de Omira et al. (2009a) é claramente demonstrado que a Zona Ferradura – Marquês de Pombal (HSMP), a Zona do Banco de Portimão (PBF) e a Zona do Prisma Acrecionário do Golfo de Cadiz (CWF) são as regiões com características mais favoráveis à geração de *tsunamis* de impacto significativo em Lagos.

A zona HSMP é considerada uma fonte compósita das duas falhas por estas terem uma continuidade geométrica e segundo Ribeiro et al. (2006), é a proposta melhor aceite como sendo a fonte geradora do evento de 1755 e que, nas mesmas condições, pode ser encarado como o pior cenário tendo, segundo Rio et al. (2003), um período de retorno de pouco mais de 1200 anos. As duas outras fontes são interessantes para este trabalho tendo em conta a proximidade e consequente reduzido tempo de viagem da primeira onda. A zona CWF foi também escolhida por fornecer um cenário de menor risco. Foram então considerados os cenários extremos para cada uma dessas zonas especificados na tabela 6.

Na figura 4 apresenta-se a altura média da onda por subsecção estatística para o cenário HSMP2.

O índice de vulnerabilidade a tsunami do edificado foi gerado pela combinação das classes de vulnerabilidade EMS-98 com os valores médios de altura de onda por subsecção estatística dos três cenários de inundação por tsunami. A estimação deste índice foi feita segundo a equação 2 (adaptada de Omira et al., 2009a) atribuindo-se um factor de peso a cada classe e um factor de classificação e calculando posteriormente uma média ponderada.

$$IVTE(\%) = \frac{(F_{c,e} \times F_{p,e}) + (F_{c,i} \times F_{p,i})}{\sum_{k=1}^2 (F_{c,max} \times F_p)} \times 100 \quad (2)$$

Onde k é o número do critério e $F_{c,max}$ corresponde ao valor máximo do factor de classificação.

A vulnerabilidade estrutural do edificado já anteriormente classificada de acordo com a Escala Macrosísmica Europeia, distingue 3 classes (figura 3): Classe B (vulnerabilidade alta); Classe C (vulnerabilidade média); Classe D (vulnerabilidade média-baixa). A cada uma destas classes foi atribuído um factor de classificação ($F_{c,e}$) consoante o grau de vulnerabilidade (B-3, C-2, D-1) e um factor de peso ($F_{p,e}$) para todo o critério de 2. O segundo critério considerado na vulnerabilidade a *tsunami* foram as áreas inundadas classificadas a partir dos valores de altura de onda em 4

classes para cada cenário (tabela 7). O factor de peso atribuído ao critério inundação ($F_{p,i}$) foi 1. Pode-se justificar a atribuição de um peso menor que o atribuído à condição do edificado, por este ter maior influência que a altura da onda, que se relaciona mais com a localização, neste caso da subsecção estatística.

Tabela 6 - Parâmetros de falha dos cenários tsunamigénicos
(L: comprimento da falha; W: largura da falha; Dip, Strike, Rake: inclinação, azimute e direcção do movimento da falha; Depth: Profundidade do fundo do mar ao topo da falha; μ : módulo de rigidez; Slip: deslizamento sobre o plano de falha; Mw: Magnitude)

Parâmetros	Falha		
	Ferradura Marquês de Pombal	Banco de Portimão	PAGC
	Cenário		
	HSMP2	PBF2	CWF4
L (Km)	120	115	170
W (Km)	80	60	200
Dip (°)	35	24	5.0
Strike (°)	20.1	266.3	349
Rake(°)	90	90	90
Depth (km)	5.0	5.0	5.0
μ ($\times 10^{10}$ Pa)	4.5	4.5	3.0
Slip (m)	12.0	9.5	16
Mw	8.75	8.25	8.75

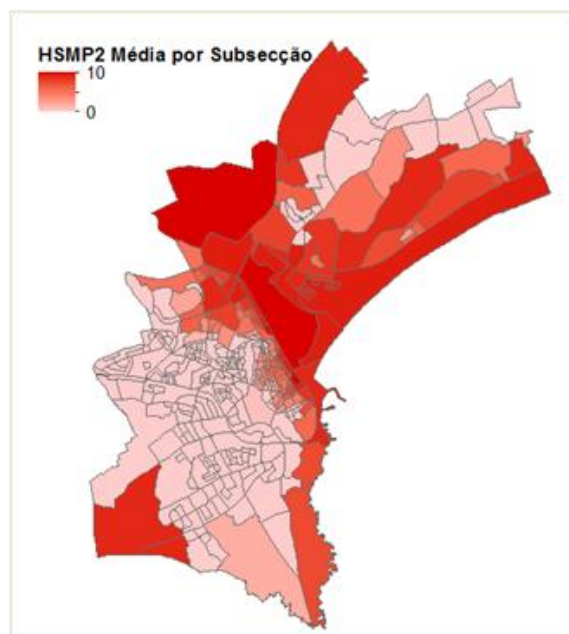


Figura 4 – Cartas de inundação por subsecção estatística para o cenário HSMP2.
(Flood map by statistical subsection for HSMP2 scenario.)

Tabela 7 – Factor de classificação da altura média da onda para os três cenários de inundação (adaptado de Omira et al., 2009a)

Cenário de inundação	Altura média da onda (m)	Factor de classificação (F_{ci})
HSMP2	0-3	1
	3-6	2
	6-9	3
	9-11	4
PBF2	0-3	1
	3-6	2
	6-9	3
	9-10	4
CWF4	0-2	1
	2-4	2
	4-6	3
	6-8	4

Os valores de percentagem do IVTE calculados pela Eq.2 são associados a um grau de dano esperado para os edifícios da subsecção. Foram consideradas então cinco categorias de nível de dano variando de D0 (sem dano) a D4 (colapso provável). Cada categoria de dano é definida consoante um intervalo da vulnerabilidade estimada para dar uma ideia mais clara no que diz respeito aos limites de resistência estrutural dos edifícios contra inundação por tsunami (tabela 8).

Tabela 8 - Classificação dos graus de dano

Categoria de dano esperado	IVTE	Designação
D0	0-20%	Sem danos
D1	20-40%	Danos leves
D2	40-60%	Danos moderados
D3	60-80%	Danos severos
D4	80-100%	Colapso provável

3.2 – ROTAS DE EVACUAÇÃO

Os mapas de rotas de evacuação por tsunami não são impressos nem elaborados como mapas compostos, mas são criados mapas dinâmicos *ad hoc* para apoiar a tomada de decisão durante as operações de evacuação (Scheer et al., 2011). Por esta razão os dados necessários para a elaboração de um plano de evacuação deve permitir uma análise tanto flexível quanto possível para que se possa adaptar a diferentes cenários de desastre.

Neste trabalho a evacuação por tsunami foi encarada como um problema assente na teoria de grafos, onde se procura maximizar o fluxo de pessoas que se deslocam numa rede, enquanto se tenta minimizar os custos dessa mesma deslocação.

A modelação das rotas de evacuação implicou portanto a utilização da extensão *Network Analyst* do ArcGIS (ESRI) para a criação de uma rede de estradas, a definição dos atributos da rede (custos, descritores e restrições), a identificação dos pontos de origem ou partida (localizados nas áreas inundadas) e dos pontos de destino (localizados em áreas seguras) e, por fim, a aplicação do algoritmo CASPER de optimização de rotas para diferentes cenários de evacuação.

A extensão *Network Analyst* está vocacionada para análise de redes de transport. Neste caso pretende-se simular circulação pedonal, excluindo-se a utilização de automóveis ou de outros veículos (são desaconselhados para a evacuação, não só por obstruírem a via mas, principalmente por representarem uma ameaça à integridade física dos pedestres). Para adaptar a rede a este tipo de mobilidade foi necessário desprezar atributos da rede como o *Oneway* (sentido único) e *Turns* (curvas e mudanças de direcção), para conferir o grau de liberdade de deslocação pretendido.

Como atributos de custo ou impedância da rede (informação que se obtém como *output* de cada rota depois de calculada) foram acrescentados o tempo que se demora a percorrer cada elemento da rede em minutos e a distância em metros. O atributo de distância é portanto associado ao comprimento de cada segmento (*shape_lenght* de cada *edge*) do tema original das estradas (rede viária). O custo de tempo de viagem em minutos requer o conhecimento da velocidade de deslocação da população a ser evacuada. Para a determinação deste valor, interessou por outro lado, distinguir o tipo de vias, por se tratar de um factor que pode condicionar a velocidade a que uma pessoa se desloca. Na rede viária da área de estudo encontram-se dois tipos de vias diferentes, *road* e *steps*. Assumiu-se como velocidade média de deslocação de um ser humano 1,04 m/s em estrada normal e no caso das escadas, devido à difícil mobilidade, este valor foi reduzido para 0,5 m/s (Scheer et al. 2011).

O cálculo do tempo de deslocação foi integrado em dois novos campos da tabela de atributos, *FT_Minutos* e *TF_Minutos* referentes ao sentido da deslocação (*FT* – direcção da digitalização, *TF* – direcção oposta da digitalização), segundo a fórmula:

$$\text{Tempo minutos} = (\text{shape_length}/\text{speed})/60 \quad (3)$$

Devido ao problema de engarrafamento das vias numa situação de evacuação, é necessário introduzir no modelo um atributo que permita simular a capacidade de fluência/escoamento da rede com o objectivo de optimizar as rotas tendo em conta o fluxo máximo de pessoas por via. Foi então adicionado um atributo descritor da capacidade da estrada, adaptando-se o atributo preexistente LANES (número de faixas de rodagem) ao número de pessoas que poderão circular em simultâneo por faixa.

O limite mínimo da largura das faixas de rodagem definido no capítulo de Infra-estruturas rodoviárias e estacionamento do PDML é de 6m. Assumindo-se que os passeios, bermas e valetas podem estar obstruídos por canteiros, mobiliário urbano, sinais de trânsito ou veículos estacionados, e considerando que o termo LANES refere-se ao número de vias de trânsito por faixa, optou-se por atribuir o valor de 3m a cada via. O atributo Capacidade acabou por ser igual ao número do atributo LANES multiplicado por 4 (referente ao número de pessoas).

Os atributos do tipo restrição servem para limitar ou excluir alguns elementos da rede aquando da análise. Neste caso específico consideraram-se como restrições as estradas que poderão ficar bloqueadas pelo colapso de edifícios. Estas barreiras foram digitalizadas sob o formato de pontos sobre o layer das estradas, nas vias que se encontram entre dois edifícios classificados como D4 (IVTE 80-100%) em termos de categoria de dano esperado em cada um dos cenários de inundação (Figura 5).

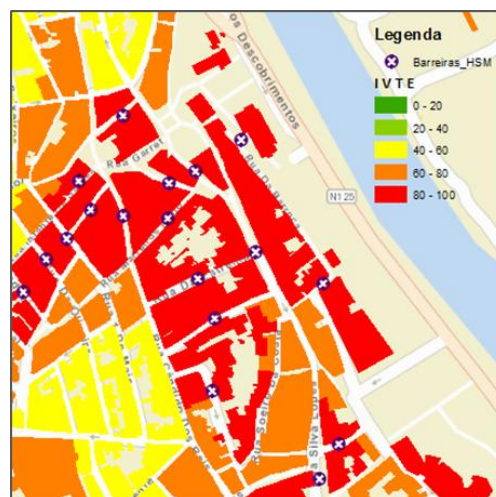


Figura 5 – Exemplo de localização de barreiras, cenário HSMP. (Example of barriers location, HSMP scenario.)

As zonas a evacuar foram aqui denominadas de áreas críticas e são compostas pelas subsecções estatísticas sistematicamente inundadas nos três cenários de inundação analisados. Foram geradas a partir da junção dos mapas de altura média de onda dos três cenários, correspondendo às subsecções com valor maior que zero. As áreas consideradas como seguras foram todas as subsecções com valor igual a zero.

De modo a que seja possível gerar rotas de evacuação são necessários dois conjuntos de pontos: os pontos de origem e os pontos de destino. Como pontos de origem consideraram-se os centroides das subsecções definidas como áreas críticas. Um aspecto importante na extracção dos pontos, foi a conservação dos atributos das subsecções, nomeadamente os referentes à população. Estes dados, servirão posteriormente para a simulação de rotas em situações temporalmente distintas com flutuações demográficas (dia-noite, época alta-época baixa). Por esta razão, os pontos de origem não foram extraídos da localização exacta dos edifícios.



Figura 6 - Localização de pontos seguros para evacuação cidade de Lagos.

(Safe evacuation points location to the city of Lagos.)

Os pontos de destino, de concentração ou encontro de evacuados que também podem ser chamados de abrigos horizontais, devem estar localizados em áreas seguras que não sejam totalmente rodeadas por áreas com risco de inundação.

Outro critério de escolha destes locais foi a relação com a rede de estradas, deve ser acessível, de preferência um ponto de confluência da rede e sem vias obstruídas na sua proximidade. Devem localizar-se junto a locais com baixa densidade de construções nomeadamente parques de estacionamento amplos, descampados ou espaços verdes pouco arborizados.

Procurou-se escolher locais relativamente próximos das áreas inundadas periféricas, para minimizar a distância dos pontos de origem, porque estas apresentam valores médios de altura de inundação apenas na ordem dos centímetros ou mesmo milímetros e também porque apenas num cenário mais extremo seriam efectivamente inundadas.

O cenário DEB foi assumido como o valor de População Presente (PP) da base de dados dos Censos2011 por estes terem sido levantados durante o mês de Janeiro no período diurno. No que respeita ao cenário NEB considerou-se como população a

evacuar o total de População Residente (PR) por subsecção estatística. Os dois cenários de época alta foram estimados de uma forma simplista (dado não se ter em posse a informação da ocupação turística), tendo em conta os resultados apresentados no estudo Modelação da Dinâmica e Mobilidade da População Presente na Região do Algarve, parte integrante do projecto ERSTA desenvolvido pelo CEG/UL em 2008. Neste estudo é apontado para o concelho de Lagos um incremento de cerca 100% da PP em relação à PR na época alta (dia de semana) num cenário maximalista. Adaptou-se portanto um valor de proporção menos optimista de 80% (para não criar assimetrias muito acentuadas entre subsecções) para o cenário DEA.

Segundo o Plano Municipal de Turismo (PEL - Plano Estratégico do Município de Lagos, 2005) a cidade de Lagos dispunha de 4746 camas oferecida pelos estabelecimentos hoteleiros existentes, o que prefaz 24% da PR da área de estudo, caso a taxa de ocupação fosse de 100%. Será falacioso admitir a generalização desta percentagem para todas as subsecções estatísticas (por esta depender fortemente da localização das unidades hoteleiras), mas para efeitos de simulação foi a assumida no cálculo do cenário NEA.

- DEB (Cenário Diurno-Época Baixa) = PP
- NEB (Cenário Nocturno-Época Baixa) = PR
- DEA (Cenário Diurno-Época Alta) = $(PR \cdot 0,8) + PP$
- NEA (Cenário Nocturno-Época Alta) = $(PR \cdot 0,24) + PR$

Para além do carregamento dos dados referentes aos evacuados, abrigos e barreiras nos respectivos layers do Network Analyst (Zones, Evacuees e Barriers), a criação de rotas de evacuação com o ArcCasper necessita a especificação dos atributos de impedância e custo, assim como a definição da *Critical Density per Unit Capacity* (constante que indica a densidade crítica de uma estrada por unidade de capacidade) e da *Saturation Density per Unit Capacity* (constante que indica a densidade de saturação de uma estrada). A densidade crítica refere-se ao número máximo de evacuados a circular sem que a velocidade de escoamento da rota seja afectada e a densidade de saturação representa o limite de evacuados a partir do qual a velocidade de escoamento da rota é reduzida para 0,368 (1/e) da velocidade original.

4. RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos para os índices de vulnerabilidade a tsunami do edificado (IVTE) para os três cenários de inundação (figuras 7, 8 e 9), pode verificar-se que, em qualquer um dos casos, estão expostos ao perigo de uma onda de tsunami mais de 2000 edifícios (cenário HSMP – 2652 edifícios, cenário PBF – 2340 edifícios, cenário CWF – 2295 edifícios) na área de estudo.

Conclui-se também que a vulnerabilidade do edificado é significativamente influenciada pela localização (exposição a um maior valor de altura de onda): as áreas costeiras e das margens da Ribeira de Bensafim apresentam um IVTE mais elevado independentemente (ou com menor influência) da vulnerabilidade estrutural. O centro histórico da cidade de Lagos é a área na qual a vulnerabilidade estrutural, por apresentar tipologias construtivas mais “frágeis”, tem maior peso no IVTE estimado que o critério da altura média da onda.

Como pode ser observado na figura 10 que indica o número de edifícios por classe de dano, as classes de dano D2 (dano moderado) e D3 (dano severo) são predominantes nos três cenários (entre 70 e 83% dos edifícios). No caso do cenário HSMP ocorre uma transferência mais acentuada de edifícios classificados com danos D2 para as classes D3 e D4 (cerca de metade do total de edifícios).

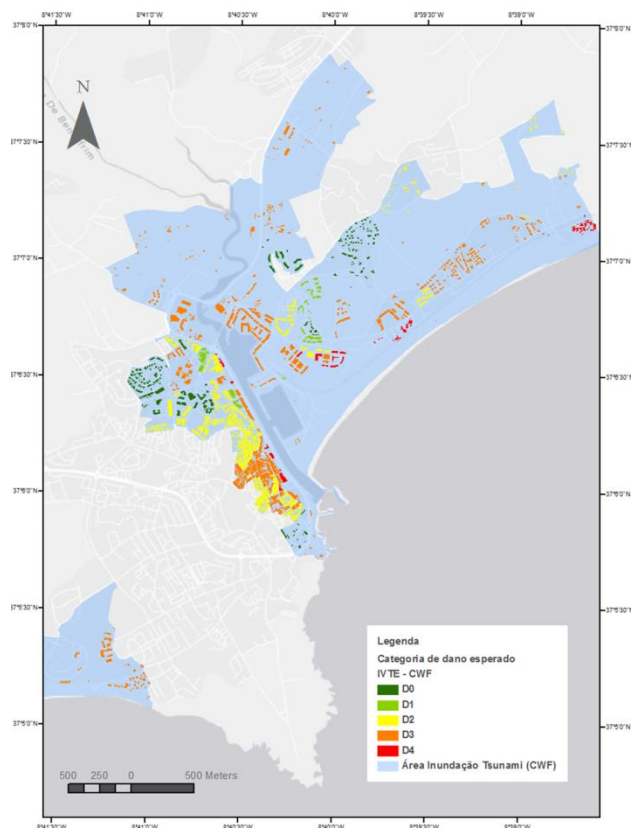


Figura 7 – Carta de Vulnerabilidade a Tsunami do Edifício de Lagos para o cenário de inundação CWF.
(*Tsunami Building Vulnerability map of Lagos for the CWF flood scenario.*)

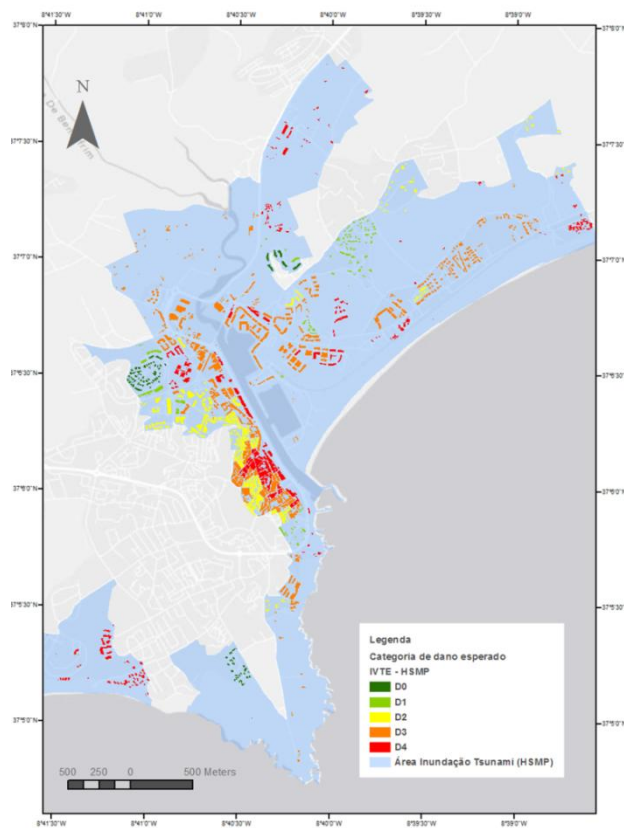


Figura 9 – Carta de Vulnerabilidade a Tsunami do Edifício de Lagos para o cenário de inundação HSMP.
(*Tsunami Building Vulnerability of Lagos for the HSMP flood scenario.*)

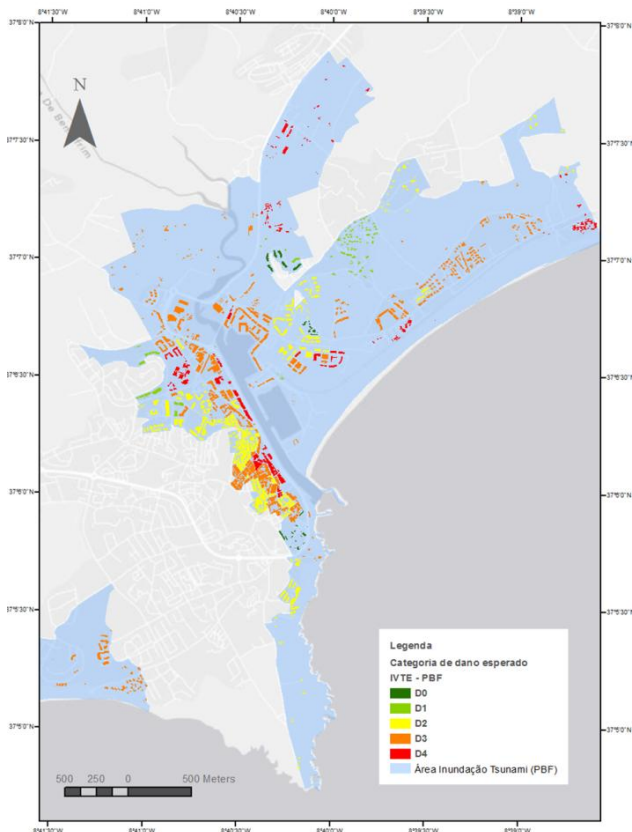


Figura 8 – Carta de Vulnerabilidade a Tsunami do Edifício de Lagos para o cenário de inundação PBF.
(*Tsunami Building Vulnerability of Lagos for the PBF flood scenario.*)

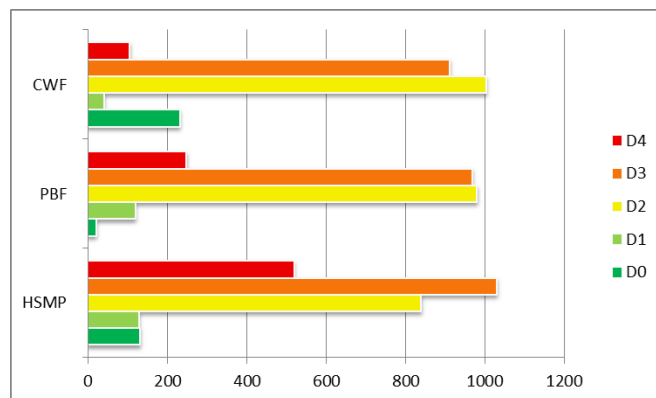


Figura 10 – Número de edifícios por categoria de dano para os três cenários de inundação.
(*Number of buildings, for each damage level, for the three inundation scenarios.*)

Com base nestas classificações pode também aferir-se a população que é directamente afectada em cada um dos cenários em função das condições de habitabilidade do edifício. A tabela 9 relaciona o número de habitantes (População Residente por subsecção estatística) por cada classe de dano e estima o número de desalojados tendo em conta que os edifícios classificados com D3 e D4 não apresentarão condições mínimas de habitabilidade após a inundação.

Tabela 9 – População afectada - Número de habitantes (PR) por categoria de dano esperado nos três cenários de inundação

	HSMP	PBF	CWF
D0	375	18	798
D1	283	279	94
D2	2319	2639	2796
D3	2155	1860	1514
D4	1192	905	294
Total	6324	5705	5496
Desalojados	3347	2765	1808

Em caso de tsunami não se consegue relacionar directamente o número de feridos ou mortos com o dano nos edifícios como em caso de sismo. Isto porque se parte do princípio de que é possível evacuar uma parte significativa da população antes da ocorrência do evento. As rotas de evacuação geradas na simulação foram classificadas consoante o tempo do percurso, o que permite a identificação dos percursos inviáveis que excedam o Tempo de Evacuação (TE).

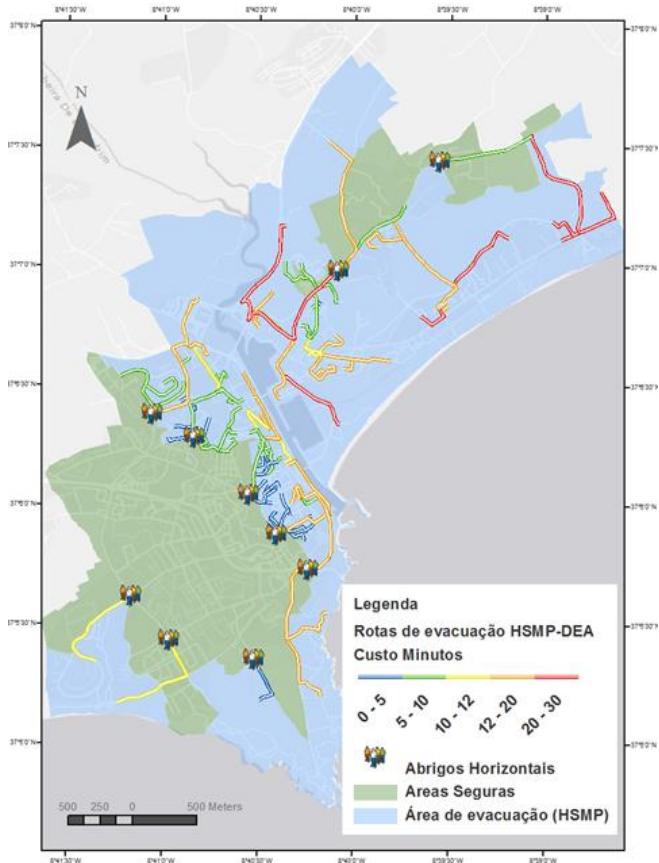


Figura 10 – Carta de Rotas de evacuação para o cenário diurno em época alta e inundação HSMP.
(Evacuation routes for daytime scenario in the high season and HSMP flood.)

O Tempo necessário para a Evacuação é o período de tempo disponível entre a emissão do alerta de tsunami e a chegada da primeira onda. Post et al. (2009) referem que existem quatro componentes do tempo de evacuação que consistem no tempo de decisão (tempo que decorre entre a detecção oficial do evento e a decisão de soar o alarme), no tempo de notificação, no tempo de reacção ou preparação da população (TR) e no Tempo esperado de Chegada de ondas de Tsunami (TCT).

Os tempos de decisão e notificação foram agregados como Tempo de Aviso (TA) e assumiu-se como tempo médio por defeito 8 minutos (Dewi 2012). A resposta de uma pessoa requer o

conhecimento dos sinais de aviso de tsunami (sismo, descida do nível do mar ou os avisos emitidos institucionalmente) e do conhecimento da comunidade de como proceder em caso de evacuação por tsunami. Trata-se de um tempo variável de pessoa para pessoa e foi assumido como tempo médio de reacção 10 minutos. O Tempo esperado de Chegada de ondas de Tsunami foi adoptado de Omira et al. (2009b) onde é estimado o Tsunami Travel Time (TTT) mínimo correspondente aos vários cenários MCE (*Maximum Credible Earthquake*) de inundação. Para o caso da costa de Lagos o TTT mínimo está entre os 25 e os 30 minutos.

O tempo de evacuação foi calculado a partir da seguinte fórmula adaptada de Post et al. (2009):

$$TE = TCT - TA - TR \quad (4)$$

TE = Tempo necessário para a evacuação (12 minutos)

TCT = Tempo esperado de Chegada de Ondas de Tsunami (30 minutos)

TA = Tempo do Aviso (decisão institucional e notificação) (8 minutos)

TR = Tempo de Resposta da População (10 minutos)

A estimativa do TE foi imprescindível para a avaliação da necessidade ou não de serem implementados abrigos verticais no modelo de evacuação. Todas as rotas de evacuação que apresentem um tempo de percurso superior ao TE (12 minutos), ou seja que não permitam a evacuação segura em tempo útil, devem estar servidas por abrigos verticais.

Na tabela 10 estão contabilizados o número de evacuados das rotas de evacuação que excedem os 12 minutos e que portanto devem ser direccionados para abrigos verticais em cada cenário de evacuação analisado.

Tabela 11 – Número de evacuados a ser direccionado para abrigos verticais por cenário de evacuação (Diferença entre população considerada por cenário e número de evacuados da simulação ArcCasper)

Cenários	DEA	DEB	NEA	NEB
HSMP	1755	1085	1366	973
PBF	1667	1040	1297	924
CWF	1643	1016	1279	911

Os abrigos verticais devem ser estruturas em betão armado ou metálicas colectivas, com função residencial, escritórios ou parques de estacionamento elevados (Scheer et al. 2011), localizados nas áreas críticas. Devem ter um número de pisos superior à altura máxima da inundação (neste caso pode admitir-se 3 ou mais pisos) e deve ser um edifício classificado como D2 ou D3 do índice de vulnerabilidade tsunami. Os edifícios seleccionados devem também ser capazes de suportar danos provocados por detritos flutuantes de grandes dimensões, transportados pela onda no primeiro impacto ou durante o recuo das águas. Nos casos em que a seleção não apresente resultados junto aos percursos de rota com mais de 12 minutos deve ser sugerida uma nova localização para a construção de abrigos artificiais.

Partindo do cenário de evacuação mais extremo (maior área inundada e maior número de população a evacuar), o HSMP-DEA, geraram-se áreas de serviço para os 4 possíveis abrigos verticais num raio de 375 metros (distância percorrida em 12 minutos à velocidade de 1,04m/s). Estas áreas demonstram que mesmo assim alguns pontos críticos (origem das rotas nas subsecções estatísticas) continuam sem rotas de evacuação viáveis. Sendo assim são propostas na figura 11 quatro localizações para a construção de abrigos verticais artificiais ao longo da estrada Nacional M534 adjacentes à Meia Praia.



Figura 11 – Carta de abrigos e rotas de evacuação inviáveis.
(Map of shelters and unviable evacuation routes.)

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos conseguidos com a informação disponíveis mostraram-se relativamente satisfatórios, o que não invalida que no futuro sejam adoptadas metodologias mais minuciosas, exaustivas e rigorosas, integrando mais e melhores dados de diversas naturezas, necessários neste tipo de estudo, como por exemplo os levantamentos de campo.

Na metodologia adoptada neste trabalho não foram integrados outros factores importantes como por exemplo a vulnerabilidade económica que possibilitaria calcular o risco tendo em conta a as perdas económicas, ou a vulnerabilidade de infraestruturas críticas, que poderiam fornecer informação pertinente principalmente para as operações de recuperação do desastre.

Apesar disso, o contributo científico tanto das cartas de vulnerabilidade como das simulações realizadas para 12 cenários poderá ser útil às autoridades competentes responsáveis pelo planeamento e socorro.

Ainda no âmbito do projecto VULRESADA, esta metodologia poderá também vir a ser adaptada ao caso de estudo da cidade de Cascais, Portugal.

6. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projecto VULRESADA, coordenado e financiado pelo Centro Europeu de Riscos Urbanos (CERU). Um especial agradecimento à Câmara Municipal de Lagos (CML), à Associação de Municípios do Algarve (AMAL) e ao Instituto Dom Luiz (IDL-UL) pelos dados disponibilizados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baptista, M.A. (1998): “Génese, propagação e impacto de tsunamis na costa portuguesa”, *Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa*, pp. 202.
- Baptista, M.A., J.M. Miranda, and Luis, J.F., (2006): “In Search of the 31th March 1761 Earthquake and Tsunami Source”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 2, pp 713-721.
- Baptista, M.A., and J.M., Miranda (2009): Revision of the Portuguese catalog of tsunamis, *Natural Hazards an Earth System Sciences*, pp. 1-18, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/25/2009/
- Barreira, E., P. Teves-Costa e R. Omira (2010): “Vulnerabilidade Sísmica do Parque Habitacional da Cidade de Lisboa”, *Sísmica 2010 – 8º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, Programa QREN_PORL*, pp 1-11.
- Costa, E., H. Vicêncio e P. Pires (2012): “Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve (ERST), Faro”, *RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, Artigo da Revista Territorium*, nº 19, 2012, pp. 51-54.

- Dewi, S. (2012): “A-Gis Based Approach of an Evacuation Model for Tsunami Risk Reduction”. *Journal of Integrated Disaster Risk Management* 2, 23, pp. 2185-8322.
- Giovinazzi, S. and S. Lagomarsino (2004): “A Macroseismic Method For The Vulnerability Assessment Of Buildings”. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada.
- Gaspar, J., J.F. Rodriguez, M. Queiróz, E.B. Henriques, P. Palma e T. Vaz (2008): “Determinação das Vulnerabilidades Humanas em Situação de Risco Sísmico e Tsunamis. O Caso do Algarve”, *ANPC e Faculdade de Letras/Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa, Inforgo*, 2007/2008, pp. 51-66.
- Grünthal, G. (1998): “European macroseismic scale 1998” *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie* 15. Luxembourg pp. 99
- Omira, R., M.A. Baptista, J.M. Miranda, E. Toto, C. Catita and J. Catalão (2009a): “Tsunami vulnerability, assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools”, *Nat Hazards*, published online: 24 september 2009.
- Omira, R., M.A. Baptista, L. Matias, J.M. Miranda, C. Catita, F. Carrilho, and E. Toto (2009b): Design of a Sea-level Tsunami Detection Network for the Gulf of Cadiz, *Nat Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1327–1338.
- Omira, R., M.A. Baptista, S. Mellas, F. Leone, N.M. Richemond, B. Zourarah, and J.P. Cherel (2012): “The November, 1st, 1755 Tsunami in Morocco: Can Numerical Modeling Clarify the Uncertainties of Historical Reports?”, *Chapter XX*, pp 1-16
- Post, J., Wegscheider, S., Muck, M., Zosseder, K., Kiefl, R., Steinmetz, T., Strunz, G., (2009). “Assessment of Human Immediate Response Capability Related to Tsunami threats in Indonesia at a Sub-national Scale.” *Natural Hazards Earth System Sciences*, 9, 1075-1086.
- Ribeiro, M.J.M. (2006): Gestão do Risco Sísmico, Análise de Risco Sísmico e Gestão de Emergência, Lisboa, Câmara Municipal de Lisboa.
- Rio, I., P.T. Costa, J. Almeida e L.A.M. Victor (2003): “Risco Sísmico na Cidade de Lagos”. *ICTE*, Lisboa.
- Scheer, S., A. Gardi, R. Guillaude, G. Eftichidis, V. Varela, B. Vanssay and L. Colbeau-Justin (2011): “Manual de Planificação de Evacuação por Tsunami, SCHEMA – Scenarios for Hazard-induced Emergencies Management (Cenários de Risco para Gestão de Emergências)” Projecto nº 030963, *Gabinete de Publicações da União Europeia*, Annalisa Gardi, Geosciences Consultants, Paris, pp. 1-54