

# ÁGUA E TERRITÓRIO

UM TRIBUTO A  
CATARINA RAMOS

# **ÁGUA E TERRITÓRIO: UM TRIBUTO A CATARINA RAMOS**

## **Editado por:**

Ana Ramos-Pereira (coord.)

Miguel Leal

Rafaello Bergonse

Jorge Trindade

Eusébio Reis

## **Capa:**

Rafaello Bergonse

**Edição:** Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa

Morada: Rua Branca Edmée Marques, Cidade Universitária, 1600-276 Lisboa, Portugal

**Gráfica:** SOARTES -ARTES GRÁFICAS, LDA

**Depósito legal:** 45008/19

**ISBN:** 978-972-636-279-1

**ISBN:** 978-972-636-280-1 (DIGITAL)

**doi:** 10.33787/CEG20190005

**Data de edição:** maio de 2019

# APLICAÇÃO DE UM PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA PARA A AVALIAÇÃO MUNICIPAL DA SUSCETIBILIDADE A CHEIAS RÁPIDAS EM PORTUGAL CONTINENTAL

Pedro Pinto Santos<sup>1</sup>  
Susana Pereira<sup>1</sup>  
Eusébio Reis<sup>1</sup>  
José Luís Zêzere<sup>1</sup>  
Ricardo A. C. Garcia<sup>1</sup>  
Sérgio Cruz Oliveira<sup>1</sup>  
Mónica Santos<sup>2</sup>

## Resumo

As cheias rápidas são tipicamente imprevisíveis no espaço e no tempo, o que torna muito complexa a gestão do risco de desastre e a mitigação dos seus impactos. Em Portugal continental, um único evento de cheias rápidas, em 25 e 26 de novembro de 1967, foi responsável por mais de metade de todas as vítimas mortais devidas a cheias, no período coberto pela base de dados DISASTER (1865-2015). Neste estudo pretende-se hierarquizar a suscetibilidade a cheias rápidas em Portugal continental, baseado na construção de um índice municipal. Partindo de um conjunto de sete fatores condicionantes – escoamento acumulado potencial, densidade da rede de drenagem, declive, depósitos aluvionares, grau de impermeabilidade do terreno, litologia de elevada permeabilidade e escoamento anual – e aplicando um processo de análise hierárquica definiu-se de forma empírica, a hierarquia e fatores de ponderação a utilizar no cálculo do índice municipal de suscetibilidade a cheias rápidas (IMSCR).

Os valores mais elevados de suscetibilidade municipal a cheias rápidas encontram-se nos municípios com sectores ribeirinhos em bacias hidrográficas de pequena e média dimensão, como sejam: a) Ave, Leça, Tâmega, Tua, Vouga, Mondego e Nabão, nas regiões Norte e Centro; b) Trancão e ribeiras que drenam os municípios de Cascais e Oeiras, na região de Lisboa; e c) Sorraia, Ardila, Odivelas (pertencente à bacia do Sado) e Oeiras (pertencente à bacia do Guadiana), na região Sul. O cruzamento dos valores do IMSCR com os registos de ocorrências e de pessoas afectadas permite identificar os contextos geográficos em que a exposição atua como

---

<sup>1</sup> Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa, Portugal. *pmpsantos@campus.ul.pt; susana-pereira@campus.ul.pt; eusebioreis@campus.ul.pt; zezere@campus.ul.pt; rgarcia@campus.ul.pt; cruzdeoliveira@campus.ul.pt.*

<sup>2</sup> Centro de Investigação e de Tecnologias Agroambientais e Biológicas, CITAB, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal. *monica.santos@utad.pt.*

fator mais relevante que a suscetibilidade na explicação das elevadas perdas observadas. Contudo, também se regista a situação inversa em que, a contextos de elevada suscetibilidade a cheias rápidas correspondem perdas reduzidas. A identificação das condicionantes físicas é fundamental para a compreensão do risco e para a adoção de estratégias de gestão e mitigação que reduzam o impacto das cheias rápidas.

**Palavras-chave:** cheias rápidas; suscetibilidade; processo de análise hierárquica; nível municipal

## 1. Introdução

As cheias rápidas são o fenómeno natural que mais vítimas causou em Portugal continental desde pelo menos o séc. XIX (Ramos e Reis, 2002; Trigo *et al.*, 2016). O evento de cheias rápidas de 25 e 26 de novembro de 1967 tem associado um total ainda hoje incerto de mais de 500 vítimas mortais – cerca de 52% de todas as vítimas mortais por cheia, registadas na base de dados DISASTER no período 1865-2010 (Zêzere *et al.*, 2014; Trigo *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2017). Apesar da excepcionalidade destes valores, este evento afetou apenas 14 dos 278 municípios de Portugal continental, ao longo de uma faixa de aproximadamente 60 km de extensão no sector norte da Área Metropolitana de Lisboa (Trigo *et al.*, 2016).

As cheias rápidas são marcadas por uma elevada imprevisibilidade temporal e dispersão espacial (Ramos e Reis, 2001; Ramos e Reis, 2002; Santos *et al.*, 2015) nas bacias hidrográficas de pequena e média dimensão, associadas à imprevisibilidade das chuvadas desencadeantes. Estas características salientam a importância das ações preventivas – ordenamento do território, sistemas de monitorização, aviso e alerta, entre outras – como as abordagens mais adequadas à redução e mitigação dos seus impactos. Ao contrário das cheias lentas ou progressivas, caracterizadas por uma evolução lenta do hidrograma de cheia e com uma incidência espacial restrita às planícies aluviais dos grandes rios, as cheias rápidas ocorrem em bacias hidrográficas de média e pequena dimensão, com tempos de concentração reduzidos e caudais de ponta excepcionais (Ramos e Reis, 2001; Ramos e Reis, 2002).

De um modo muito sucinto, refiram-se alguns estudos anteriores realizados em Portugal, que demonstram e salientam as especificidades das cheias rápidas ao nível dos fatores condicionantes de natureza climática, hidrológica e geomorfológica, bem como dos contextos sociais em que os processos físicos se desenvolvem. Fragoso *et al.* (2012) estudaram as cheias rápidas de 20 de fevereiro de 2010 na Ilha da Madeira ao nível das condições sinópticas que promoveram a anómala disponibilidade de humidade e o mecanismo de elevação orográfica que induziu a actividade convectiva. Leal e Ramos (2013) analisaram 12 pequenas e médias bacias hidrográficas do sector norte da Área Metropolitana de Lisboa e avaliaram a sua suscetibilidade à geração de cheias, relacionando esse conhecimento com as modificações de uso do solo e seus impactos, quer nos tempos de concentração, quer na exposição das populações causada pela

ocupação humana das áreas propensas a inundação. Dado o carácter muito localizado dos processos hidrometeorológicos que geram cheias rápidas, a incorporação de bases de dados específicas e com boa georreferenciação – nomeadamente as provenientes da atividade seguradora – na análise dos locais afectados e da tipologia de perdas revelou-se uma mais-valia na avaliação dos danos materiais associados aos processos hidrológicos mais frequentes e menos severos, para além dos eventos excepcionais (Leal *et al.*, 2018). No entanto, este tipo de análise limitou-se apenas à Área Metropolitana de Lisboa. As bases de dados de ocorrências hidrogeomorfológicas, como a base de dados DISASTER são essenciais para análise da distribuição espaço-temporal dos danos humanos (mortos, feridos, evacuados, desalojados e desaparecidos) gerados por cheias em Portugal continental (Zêzere *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2015; Trigo *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2017).

Portugal continental apresenta uma área de 89089 km<sup>2</sup>, da qual mais de metade é drenada por bacias internacionais, das quais se destacam as bacias dos rios Minho (1920 km<sup>2</sup> em território nacional), Douro (18245 km<sup>2</sup>, *idem*), Tejo (25906 km<sup>2</sup>, *idem*) e Guadiana (12054 km<sup>2</sup>, *idem*). Quanto aos rios exclusivamente portugueses, o Sado é o que apresenta a maior bacia hidrográfica (7692 km<sup>2</sup>), seguido pelo Mondego (6645 km<sup>2</sup>) e Vouga (3632 km<sup>2</sup>) (APA, 2016). Contudo, no estudo da problemática das cheias rápidas em Portugal continental, interessa considerar principalmente as pequenas e médias bacias hidrográficas – quer as que compõem bacias transfronteiriças quer as que compõem bacias de menor dimensão.

O regime fluvial é determinado fundamentalmente pelo regime da precipitação. A fusão das neves, embora possa ter um papel no escoamento fluvial em grandes bacias, como a do rio Tejo (Diéz-Herrero *et al.*, 2013), tem uma influência praticamente desconhecida, mas certamente negligenciável, em termos de suscetibilidade a cheias rápidas no contexto nacional, tanto mais que estas cheias são mais frequentes na metade Sul do País. As cheias rápidas mais mortíferas em Portugal continental ocorreram em 1967, 1983 e 1997, localizando-se, respetivamente, nas regiões de Lisboa, Alentejo e Algarve (Ramos e Reis, 2001). Esta mesma característica é salientada em Santos *et al.* (2017) onde, partindo da análise de seis bacias hidrográficas – três no norte e três no sul do país – no período 1950-2003, se verificou que 96 das 131 cheias rápidas detetadas haviam ocorrido nas bacias do Sul.

De acordo com os registos de perdas recolhidos no âmbito do projecto DISASTER (Zêzere *et al.*, 2014), as cheias rápidas são o tipo de cheia que causou o maior número de vítimas mortais em Portugal continental (Pereira *et al.*, 2016). Não sendo o tipo de cheia mais frequente em termos de ocorrências que cumprem os critérios da base de dados DISASTER – a existência de uma ou mais vítimas mortais, pessoas desaparecidas, feridas, evacuadas ou desalojadas – é, contudo, o processo de cheia responsável por maior número de mortos em quase todas as NUTS II do território continental, principalmente nas regiões do Centro, Lisboa e Sul (Pereira *et al.*, 2016). No período 1865-2015, 21% das ocorrências do tipo DISASTER estão associadas a cheias rápidas em Portugal continental.

O registo histórico de perdas associadas a cheias e inundações em Portugal continental de 1865 a 2015 contabiliza 1605 ocorrências na base de dados DISASTER. Destas, 393 ocorrências relacionam-se unicamente com processos de cheia rápida. Deve-se salientar que a classificação da tipologia de cheias baseada em fontes hemerográficas, como no caso da base de dados DISASTER, por vezes levanta algumas dúvidas na interpretação do processo físico em causa, devido à descrição pouco detalhada das ocorrências. Na dúvida, as cheias rápidas foram associadas a processos de escoamento repentino em pequenas bacias hidrográficas e em contexto não totalmente urbano. Não obstante esta dificuldade, parece clara a existência de uma relação próxima entre as ocorrências classificadas como cheias rápidas e inundações urbanas, dado o elemento comum que é a existência de bacias hidrográficas de pequena e média dimensão.

A distribuição espacial das ocorrências do tipo DISASTER associadas a cheias rápidas permite verificar a existência de uma elevada concentração de ocorrências na Região de Lisboa (sobretudo nas pequenas bacias da margem direita do Tejo, e nas pequenas bacias dos municípios de Cascais e Oeiras), fortemente associadas aos eventos de cheias rápidas de 1967 e 1983 (Figura 1). Em contraste, observa-se uma ausência ou um número muito reduzido de ocorrências na Região Norte e Centro (ausência nas áreas cársticas do Maciço de Sicó e Maciço Calcário Estremenho) mas também na Península de Setúbal, sector oriental da serra algarvia, zona raiana da Beira Baixa até Trás-os-Montes e, por fim, nas áreas de interflúvio entre os rios Tejo e Sorraia e entre este e o rio Sado. Finalmente, nas restantes áreas, existe uma dispersão de ocorrências, onde se realçam as bacias dos rios Lima, Tâmega, Vouga, Mondego, Zêzere, ribeiras do Oeste e sectores do Alto e Baixo Alentejo, bem como do Algarve (estes últimos marcados pelas cheias rápidas de novembro de 1997).

O presente estudo contribui para o conhecimento da suscetibilidade a cheias rápidas ao sintetizar e analisar um conjunto de fatores condicionantes ao nível municipal. O objetivo principal é a elaboração de um índice municipal de suscetibilidade a cheias rápidas aplicado à escala nacional que caracterize e hierarquize os municípios de Portugal continental. Posteriormente, será realizada uma análise cruzada entre o índice municipal de suscetibilidade a cheias rápidas e o registo de danos humanos ocorridos no passado.

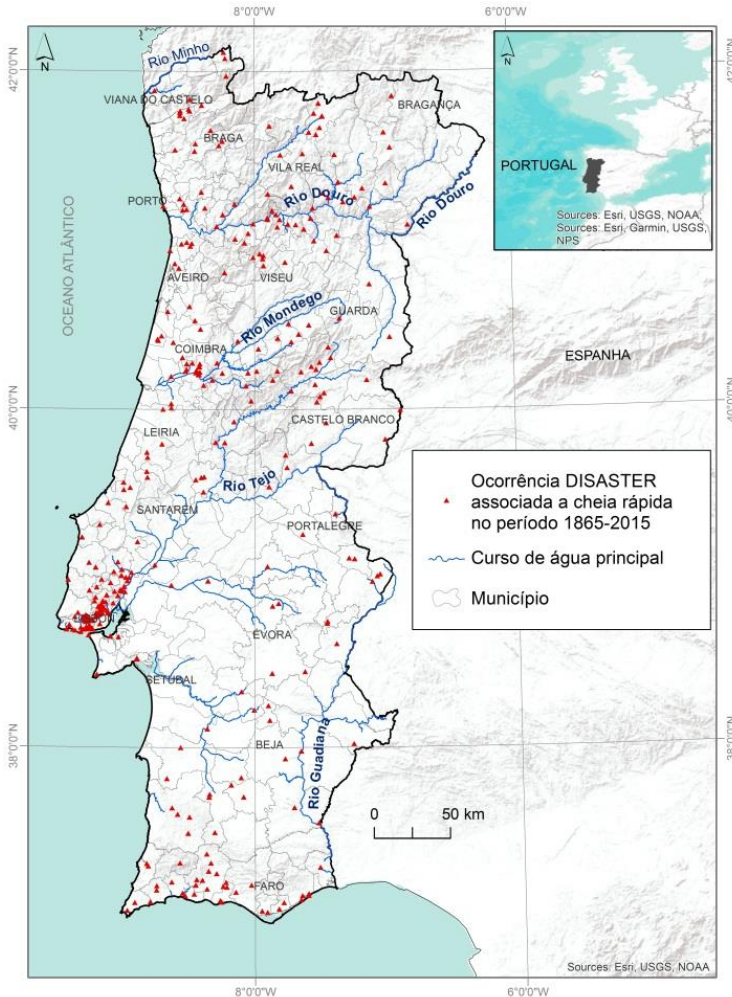


Figura 1. Ocorrências de cheias rápidas em Portugal continental, segundo a base de dados DISASTER (1865-2015).

## 2. Metodologia

Para a avaliação da suscetibilidade a cheias rápidas foram considerados sete fatores condicionantes: escoamento acumulado potencial, densidade da rede de drenagem, declive, depósitos aluvionares, grau de impermeabilidade do terreno, litologia de elevada permeabilidade e escoamento anual (Figura 2). Os valores das variáveis foram convertidos para um valor único por município e normalizados de 0 a 100. Posteriormente, aplicou-se um processo de análise hierárquica para ponderação dos fatores condicionantes e cálculo do índice municipal de suscetibilidade a cheias rápidas.

## 2.1. Fatores condicionantes

### ***Escoamento acumulado potencial***

O escoamento acumulado potencial é frequentemente considerado o fator mais importante na avaliação da suscetibilidade a cheias (e.g., Kazakis *et al.*, 2015). Em pequenas bacias hidrográficas este parâmetro pode ser utilizado como indicador do volume de precipitação útil na bacia hidrográfica. O valor de cada célula representa o número de células que estão a montante, pelo que, valores elevados de escoamento acumulado potencial significam uma área contributiva maior a montante, com potencial para gerar maiores valores de escoamento, resultando numa maior suscetibilidade a cheias.

O escoamento acumulado potencial foi obtido por aplicação da função *Flow Accumulation* da extensão *Spatial Analyst*<sup>®</sup> do programa *ArcGIS*<sup>®</sup> utilizando o *Digital Elevation Model over Europe* (EU-DEM) disponibilizado pela Agência Europeia do Ambiente (AEA, 2017) com uma resolução de 25 m. A opção por esta fonte de informação prende-se com o facto de ser necessário considerar o contributo para o escoamento das bacias transfronteiriças. De modo a não valorizar os cursos de água mais extensos e que apenas experienciam cheias progressivas, excluíram-se da representação do escoamento acumulado potencial as células com valores superiores a  $8 \times 10^6$ .

### ***Densidade da rede de drenagem***

A forma como se organiza a rede de drenagem e a sua densidade condicionam quer o tempo para a ponta de cheia quer a sua magnitude. Mantendo constantes os restantes fatores, quanto mais densa for a rede de drenagem menor é o tempo de circulação do escoamento sob a forma não canalizada, menor será o tempo para a ponta de cheia e maior o caudal, aumentando a suscetibilidade para a ocorrência de cheia (Patton e Baker, 1976; Lencastre e Franco, 1984; Reis, 2006; Hipólito e Vaz, 2012).

A informação vectorial relativa à rede de drenagem é aquela disponibilizada no Atlas da Água através do Sistema Nacional de Informação de Ambiente (APA, 2018) que disponibiliza uma rede hidrográfica definida automaticamente recorrendo a ferramentas SIG e que tem por base um modelo digital de terreno (MDT) com resolução de 25 m. Verificou-se contudo que, em virtude do processo automático que é adotado na definição da rede hidrográfica, a mesma não é diferenciadora dos contextos de drenagem: municípios com redes de drenagem e permeabilidade muito distintas surgem com densidades de drenagem aproximadas. Neste contexto, calculou-se a hierarquia fluvial segundo *Strahler* (Strahler, 1964) para a totalidade da área de estudo. Em seguida, calculou-se a densidade de drenagem utilizando apenas as linhas de água com ordem  $\geq 3$ .

## Declive

Em termos de suscetibilidade a cheias, as áreas de declive reduzido – geralmente, inferior a  $2^\circ$  – são aquelas onde se irá acumular o escoamento gerado a montante. As áreas adjacentes aos canais são os locais para onde naturalmente se expandirá o perímetro de inundação em situação de cheia.

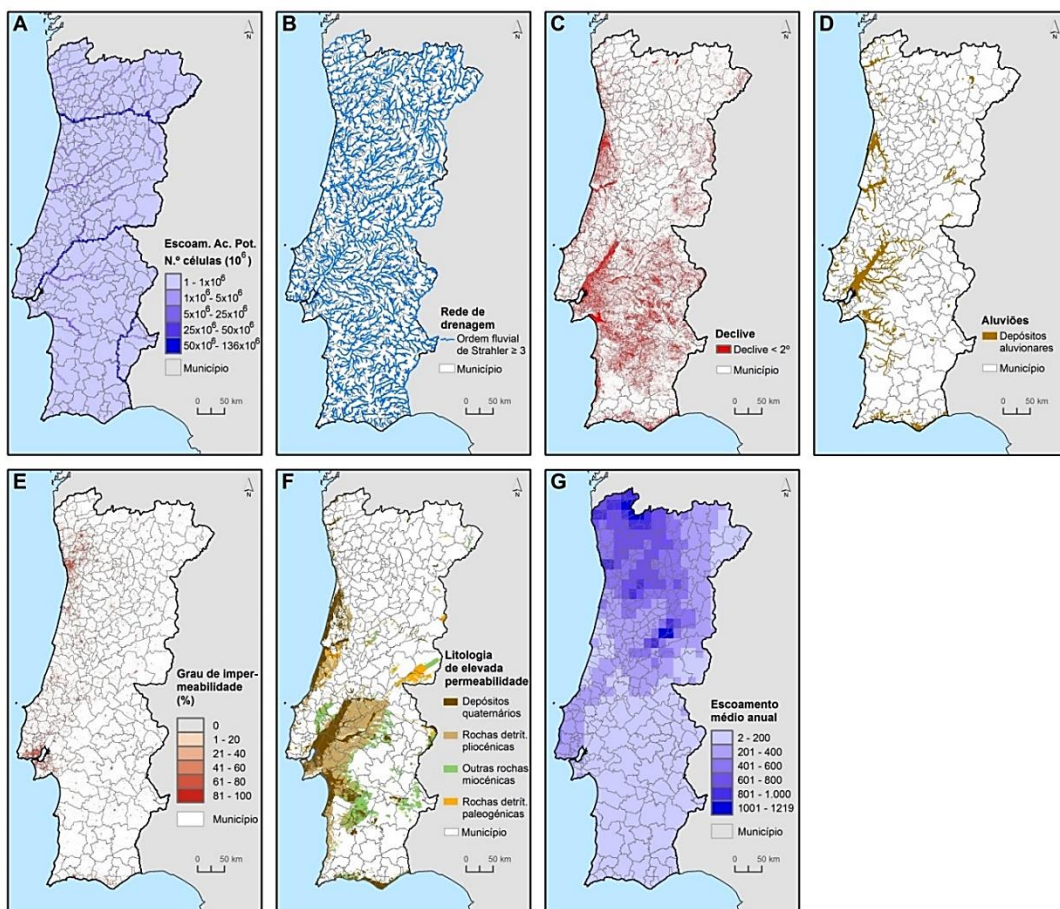


Figura 2. Fatores condicionantes seleccionados para a avaliação da suscetibilidade a cheias rápidas em Portugal continental: a) escoamento acumulado potencial; b) rede de drenagem; c) declive  $< 2^\circ$ ; d) depósitos aluvionares; e) grau de impermeabilidade do terreno; f) litologia de elevada permeabilidade; g) escoamento médio anual.

O declive foi obtido por aplicação da função *Slope* da extensão *3D Analyst*<sup>®</sup> do programa *ArcGIS*<sup>®</sup>, tendo por base o EU-DEM de 25 m. O resultado, em graus, foi reclassificado de modo a incluir unicamente as áreas de declive  $< 2^\circ$ , excluindo-se da análise as áreas de albufeira de barragens (declive igual a  $0^\circ$ ).

### ***Depósitos aluvionares***

A consideração dos depósitos aluvionares como fator condicionante da suscetibilidade a cheias rápidas assenta no princípio fundamental da geologia de que “o passado é a chave do presente” (Hutton, 1788). Com efeito, a configuração litológica – e geomorfológica – atual apenas pode ser explicada pela compreensão dos processos ocorridos no passado. A existência actual de aluviões num dado fundo de vale numa pequena bacia hidrográfica significa que a sua deposição se deu por ocasião de cheias passadas que, possivelmente, poderão voltar a ocorrer no futuro, mantendo-se o contexto morfológico.

A Carta Geológica de Portugal na escala de 1:500 000 foi a fonte de informação geológica que serviu de base à identificação das áreas de depósitos aluvionares (Oliveira *et al.*, 1992). Cruzando este nível de informação com a Carta Administrativa Oficial de Portugal para 2017 (DGT, 2017) verifica-se que existem 130 municípios com depósitos aluvionares.

### ***Grau de impermeabilidade do terreno***

O grau de impermeabilidade do terreno tal como disponibilizado pela Direção Geral do Território (DGT, 2018) a partir de dados de uso e ocupação do solo do *Corine Land Cover* de 2012 (CLC'2012), distingue as áreas artificializadas entre 1 e 100, exprimindo assim em % a impermeabilidade associada a cada tipo de ocupação do solo. O valor de zero é atribuído a todas as áreas não artificializadas (códigos 2, 3, 4 e 5 do 1º nível de representação da CLC'2012). A consideração da impermeabilidade do terreno para a avaliação da suscetibilidade a cheias é relevante sobretudo em pequenas e médias bacias hidrográficas, com forte ocupação humana. Quanto maior a impermeabilidade menor a infiltração da precipitação e mais rapidamente ocorrerá a ponta da cheia a jusante.

### ***Litologia de elevada permeabilidade***

As formações litológicas de elevada permeabilidade favorecem a infiltração da água, reduzindo o escoamento superficial em favor da circulação subterrânea, aumentando por essa via o tempo de concentração e atenuando o pico do caudal de cheia. Esta influência é válida tanto para as áreas de cabeceira e vertente como para os leitos fluviais onde ocorre a acumulação do escoamento. As áreas de elevada permeabilidade são assim aquelas que, mantendo-se constantes os restantes fatores, apresentam menor suscetibilidade para gerar cheias rápidas. Recorrendo igualmente à Carta Geológica de Portugal (Oliveira *et al.*, 1992) identificaram-se como áreas de elevada permeabilidade as seguintes classes litológicas: depósitos quaternários, rochas detríticas pliocénicas e paleogénicas e outras rochas miocénicas.

### ***Escoamento anual***

Na ausência de variáveis que representem a distribuição espacial da precipitação diária ou horária máximas, assume-se que os quantitativos diários ou horários que geram cheias em pequenas e médias bacias hidrográficas, têm correlação com os valores anuais de precipitação. Por esse motivo utiliza-se o escoamento anual para diferenciar a área de

estudo de acordo com o potencial para gerar situações de cheia: quanto maior o escoamento maior será a propensão para a ocorrência de cheias rápidas e lentas. O escoamento anual médio, representado por células de  $0,125^\circ \times 0,125^\circ$  (aproximadamente 10 km x 13 km), foi obtido do portal do *Joint Research Centre* (CE e JRC, 2014). Esta variável é calculada a partir de dados de escoamento observados em perto de 4000 pequenas e médias bacias hidrográficas distribuídas pelo globo, relacionando essas observações com os atributos das bacias em termos de precipitação, topografia, uso do solo, solos e geologia, permitindo estimar assim o escoamento para as bacias não monitorizadas (Beck *et al.*, 2015).

## **2.2. Representação municipal dos fatores condicionantes**

Numa fase inicial procedeu-se à identificação e exclusão da área do território municipal – definida segundo a CAOP de 2016 –, das seguintes tipologias de acordo com o Atlas da Água disponível em APA (2018): corpos de água superficiais e rias. Os reservatórios de barragens tal como identificados na Carta de Ocupação do Solo de 2015 (COS'2015) e a área da lezíria do rio Tejo também foram excluídos à área dos municípios. Este procedimento tem por objetivo não considerar as áreas que manifestamente não são afectadas por cheias rápidas e cuja inclusão iria introduzir um erro significativo na representação dos fatores condicionantes da suscetibilidade a cheias rápidas de alguns municípios, nomeadamente daqueles com vastas áreas intertidais ou atravessados pelos grandes rios transfronteiriços.

Cada um dos fatores condicionantes foi expresso ao nível do município com recurso às variáveis identificadas na Tabela 1. Os valores das variáveis, tal como resumidos na tabela, foram posteriormente normalizados de 0 a 100, com exceção das variáveis que já se encontravam expressas em percentagem.

Relativamente ao fator condicionante relacionado com a litologia de elevada permeabilidade, deve-se realçar que quanto maior a presença destas classes litológicas menor a suscetibilidade para a ocorrência de cheias rápidas, havendo uma relação inversa. Por este motivo, e dado que para efeitos de cálculo do IMSCR se pretende que um valor elevado neste fator contribua para maior suscetibilidade, o valor da variável foi invertido ( $100 - i$ ).

## **2.3. Aplicação do processo de análise hierárquica e cálculo da suscetibilidade a cheias rápidas**

A hierarquia e peso de cada um dos sete fatores condicionantes da suscetibilidade a cheias rápidas foram definidos pelos autores através do processo de análise hierárquica (AHP). A AHP consiste numa teoria geral de medida que permite apoiar a articulação, hierarquização e ponderação de diversas opções ou fatores (Saaty, 1987). Recorrendo a

uma matriz de comparações par-a-par (Tabela 2), a relevância dos sete fatores na explicação da suscetibilidade a cheias rápidas é avaliada, tendo por base a questão “quão importante é o fator A relativamente ao fator B”?

Tabela 1. Variáveis que expressam os fatores condicionantes a cheias rápidas ao nível municipal.

Fator condicionante	Variável expressa ao município	Acrónimo da variável	Unidade	Mín.	Média	Máx.
Escoamento acumulado potencial	Valor médio do escoamento acumulado potencial	VMEAP	Nº de células (250 x 250 m)	0,02*10 <sup>6</sup>	22*10 <sup>6</sup>	136*10 <sup>6</sup>
Densidade da rede de drenagem	Densidade da rede de drenagem de ordem de <i>Strahler</i> ≥ 3	DRD	km/km <sup>2</sup>	0,00	0,21	0,46
Declive	Áreas de declives < 2°	AD	%	0,3	13,1	53,5
Depósitos aluvionares	Áreas cobertas por depósitos aluvionares	ACDA	%	0,0	2,38	42,4
Grau de impermeabilidade do terreno <sup>(a)</sup>	Grau de impermeabilidade médio segundo a CLC 2012	GIM	%	0,3	6,4	64,0
Litologia de elevada permeabilidade	Áreas cobertas por litologia de elevada permeabilidade	ACLEP	%	0,0	80,6	100,0
Escoamento anual	Valor médio do escoamento anual	VMEAn	mm/ano	17,1	335,5	948,7

<sup>(a)</sup>Apesar de o grau de impermeabilidade ser originalmente já representado em % os valores foram normalizados igualmente para o intervalo [0, 100] pois ao contrário das restantes variáveis expressas em %, esta representa uma característica (a impermeabilidade do terreno) e não uma proporção de uma característica.

Do processo de aplicação da AHP resultam os pesos a atribuir a cada fator, validados segundo o rácio de consistência resultante da hierarquização efectuada. Para a hierarquia e pesos indicados na Tabela 2, o rácio de consistência obtido é de 0,04 que, sendo inferior a 0,1, é considerado um indicador da boa consistência da avaliação realizada (Saaty, 1987:165). Os pesos obtidos são utilizados na Eq. 1 de modo a calcular o índice municipal de suscetibilidade a cheias rápidas (IMSCR):

$$IMSCR = \sum_{i=1}^n v_i \cdot p_i = v_1 \cdot p_1 + \dots + v_n \cdot p_n \quad (\text{Eq. 1})$$

em que  $v_i$  é o valor do fator  $i$  em cada município,  $p_i$  é o peso de cada fator  $i$  e  $n$  é o número de fatores condicionantes.

Tabela 2. Matriz de comparações par-a-par segundo a escala fundamental de Saaty para os fatores condicionantes a cheias rápidas e respectivos pesos.

Fatores*	VMEAP	DRD	GIM	AD	ACDA	ACLEP	VMEAn	Peso
VMEAP	1	2	3	4	5	6	7	0,350
DRD	1/2	1	2	3	4	5	6	0,237
GIM	1/3	1/2	1	2	3	4	5	0,159
AD	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	0,106
ACDA	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	0,070
ACLEP	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	0,046
VMEAn	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0,032

\* Para facilidade de leitura, os fatores são inseridos na matriz já segundo a hierarquia definida.

Legenda: VMEAP - Valor médio do escoamento acumulado; DRD - Densidade da rede de drenagem de ordem de *Strahler*  $\geq$  3; AD - Áreas de declives inferiores a 2° (AD); ACDA - Áreas cobertas por depósitos aluvionares; GIM - Grau de impermeabilidade médio segundo a CLC 2012; ACLEP - Áreas cobertas por litologia de elevada permeabilidade; VMEAn - Valor médio do escoamento anual.

### 3. Resultados

Os resultados do IMSCR foram divididos em 10 classes utilizando o método de classificação em decis (Figura 3).

O IMSCR varia desde um mínimo de 6,8, no município de Golegã, até um máximo de 59,3 no município de Barrancos, apresentando valor médio de 22 e mediana de 21,1. Os resultados obtidos, segundo a hierarquia e pesos dos fatores condicionantes definidos, indicam como mais suscetíveis os municípios incluídos nas bacias dos rios: a) Ave, Leça, Tâmega, Tua, Vouga, Mondego e Nabão, na região Norte e Centro; b) Trancão e ribeiras de Cascais e Oeiras, na região da Grande Lisboa; c) Sorraia, Odivelas (bacia hidrográfica do rio Sado), Ardila e Oeiras (bacia hidrográfica do rio Guadiana), nas regiões a sul do rio Tejo (Figura 3). O valor do IMSCR é menor na generalidade dos municípios localizados nos seguintes contextos: a) vale inferior dos rios Tejo e Sado, onde predominam as cheias lentas em detrimento das cheias rápidas; b) zonas costeiras cujos municípios não são atravessados por cursos de água relevantes, como por exemplo, Peniche, Sines ou Vila do Bispo; c) cabeceira de bacias hidrográficas, como por exemplo, os municípios de Trancoso, Sernancelhe e Aguiar da Beira situados na zona de interflúvio entre o Rio Távora (pertencente à bacia hidrográfica do rio Douro) e o rio Dão (pertencente à bacia hidrográfica do rio Mondego), e o município de Cuba (no interflúvio entre os rios Sado e Guadiana) (Figura 3).

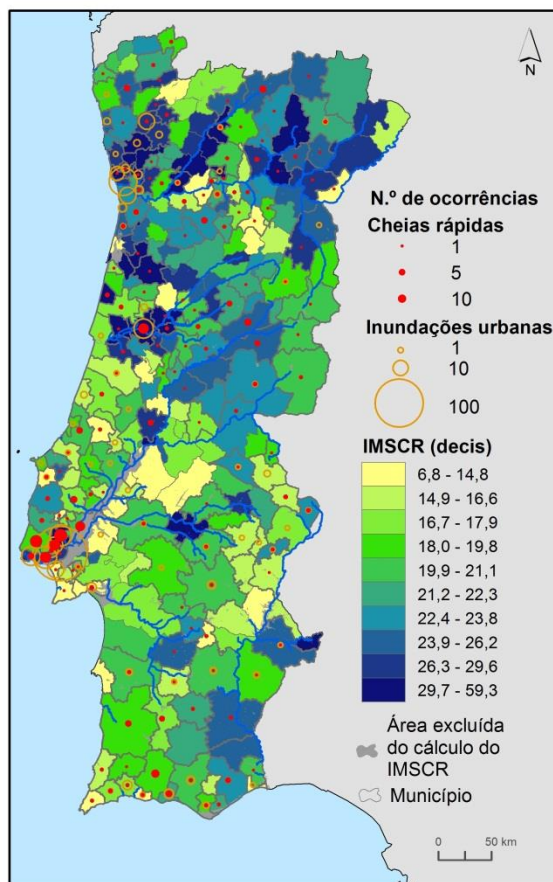


Figura 3. Índice municipal de suscetibilidade a cheias rápidas em Portugal continental e registo histórico de ocorrências de perdas de tipologia DISASTER relacionadas e cheias rápidas e inundações urbanas.

Os cinco municípios com maiores valores de IMSCR têm – praticamente todos – em comum, valores elevados nos dois fatores que maior peso têm no IMSCR: escoamento acumulado e densidade da rede de drenagem (Tabela 3). Por oposição, os cinco municípios de menor IMSCR situam-se praticamente todos no 5º quintil relativamente àqueles mesmos fatores. A diversidade geográfica do país em matéria de condições – sobretudo naturais – que influenciam a suscetibilidade às cheias rápidas está bem evidente no facto de que mesmo os municípios com maior IMSCR se situarem nos últimos quintis relativamente a alguns dos fatores condicionantes de menor peso (o município de Barrancos, por exemplo, ao nível da existência de depósitos aluvionares, grau de impermeabilidade do terreno e escoamento anual). A situação inversa também é observável relativamente aos municípios com menor IMSCR (Tabela 3).

Tabela 3. Hierarquia dos cinco municípios com maior e menor IMSCR.

Os valores assinalados a negrito com fundo cinza representam a posição do valor em cada fator condicionante no 1º quintil de municípios e apenas a negrito a posição do 5º quintil.

Ordem	Município	VMEAP	DRD	AD	ACDA	GIM	ACLEP	VMEAn	IMSCR
1º	Barrancos	<b>85,8</b>	<b>100,0</b>	6,5	<b>0,0</b>	<b>0,6</b>	<b>100,0</b>	<b>7,6</b>	<b>59,3</b>
2º	V. N. da Barquinha	<b>100,0</b>	<b>60,3</b>	14,4	3,4	11,6	<b>59,9</b>	10,1	<b>56,0</b>
3º	Coimbra	<b>82,7</b>	<b>66,9</b>	14,5	<b>14,0</b>	<b>14,6</b>	76,2	22,9	<b>53,9</b>
4º	S. João da Madeira	<b>1,4</b>	<b>100,0</b>	7,3	<b>0,0</b>	<b>70,5</b>	<b>100,0</b>	60,7	<b>42,7</b>
5º	Vila Nova de Poiares	<b>60,1</b>	57,3	5,3	<b>0,0</b>	4,4	<b>100,0</b>	28,4	<b>41,4</b>
274º	Porto de Mós	<b>1,0</b>	<b>15,3</b>	9,1	<b>0,0</b>	5,8	90,1	32,8	<b>11,1</b>
275º	Fr. de Espada à Cinta	<b>1,7</b>	<b>20,9</b>	<b>2,9</b>	<b>0,0</b>	<b>0,8</b>	99,8	16,9	<b>11,1</b>
276º	V. R. Santo António	<b>0,7</b>	<b>12,5</b>	<b>29,9</b>	1,7	11,7	<b>52,6</b>	<b>6,5</b>	<b>11,0</b>
277º	Lagoa	4,3	<b>0,0</b>	21,0	<b>9,1</b>	<b>22,1</b>	<b>17,5</b>	<b>3,3</b>	<b>8,8</b>
278º	Golegã	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>49,9</b>	<b>0,0</b>	<b>0,6</b>	<b>24,9</b>	<b>7,3</b>	<b>6,8</b>

Legenda: VMEAP - Valor médio do escoamento acumulado; DRD - Densidade da rede de drenagem de ordem de *Strahler*  $\geq 3$ ; AD - Áreas de declives inferiores a 2º (AD); ACDA - Áreas cobertas por depósitos aluvionares; GIM - Grau de impermeabilidade médio segundo a CLC 2012; ACLEP - Áreas cobertas por litologia de elevada permeabilidade; VMEAn - Valor médio do escoamento anual.

A matriz de correlações de *Pearson* entre as sete variáveis definidas a partir dos fatores condicionantes e o IMSCR (Tabela 4) mostra que, no geral, existem fracas correlações entre os sete fatores, com exceção da relação entre as áreas de declive  $< 2^\circ$  (AD) e as classes litológicas com elevada permeabilidade (ACLEP) (-0,727), e entre as primeiras (AD) e o escoamento anual médio (VMEAn) (-0,557). Os dois fatores condicionantes que receberam os maiores pesos na AHP são aqueles que apresentam os coeficientes de correlação mais elevados com o IMSCR: 0,753 com a variável relacionada ao escoamento acumulado (VMEAP) e 0,689 com a variável relacionada à densidade da rede de drenagem (DRD).

Os eventos extremos, como a cheia rápida de novembro de 1967, evidenciam-se claramente na comparação entre o IMSCR e o número de ocorrências do tipo DISASTER (Figura 4, à esquerda), contudo, é isolando a análise pelo número de pessoas afetadas que se realçam os municípios mais atingidos por aquele evento extremo – Odivelas, Loures e Vila Franca de Xira (Figura 4, à direita).

A Figura 4 salienta ainda os contextos geográficos de número de ocorrências com a tipologia DISASTER acima da média (1,41 ocorrências por município) mas com reduzido impacto ao nível do número de pessoas afetadas, dos quais os municípios de Ourique, Covilhã ou Chaves são exemplo. No sentido contrário, por exemplo encontram-se os municípios de Soure e Tomar – que apresentam apenas 2 e 4 ocorrências, respetivamente, mas um número de pessoas afetadas muito acima da média de 23,2 pessoas por município – testemunham contextos de maior exposição pontual, dado que

os respetivos valores de IMSCR de 27,2 e 28,3, são próximos ao valor médio de Portugal continental (22).

Tabela 4. Matriz de correlações de *Pearson* entre os fatores condicionantes a cheias rápidas e o índice municipal de suscetibilidade a cheias rápidas (IMSCR). A negrito estão assinaladas as correlações < -0,5 e > 0.5.

Fator	VMEAP	DRD	GIM	AD	ACDA	ACLEP	VMEAn	IMSCR
VMEAP	1	0,274	-0,147	-0,128	0,038	0,059	0,004	<b>0,753</b>
DRD	0,274	1	-0,147	-0,294	-0,087	0,289	0,092	<b>0,689</b>
GIM	-0,147	-0,147	1	0,176	0,172	-0,162	0,145	0,218
AD	-0,128	-0,294	0,176	1	0,448	<b>-0,727</b>	<b>-0,557</b>	-0,183
ACDA	0,038	-0,087	0,172	0,448	1	-0,433	-0,125	0,076
ACLEP	0,059	0,289	-0,162	<b>-0,727</b>	-0,433	1	0,482	0,227
VMEAn	0,004	0,092	0,145	<b>-0,557</b>	-0,125	0,482	1	0,207
IMSCR	<b>0,753</b>	<b>0,689</b>	0,218	-0,183	0,076	0,227	0,207	1

Legenda: VMEP - Valor médio do escoamento acumulado; DRD - Densidade da rede de drenagem de ordem de *Strahler*  $\geq 3$ ; AD - Áreas de declives inferiores a 2° (AD); ACDA - Áreas cobertas por depósitos aluvionares; GIM - Grau de impermeabilidade médio segundo a CLC 2012; ACLEP - Áreas cobertas por litologia de elevada permeabilidade; VMEAn - Valor médio do escoamento anual. A negrito estão assinaladas as correlações superiores a 0,5 ou inferiores a -0,5.

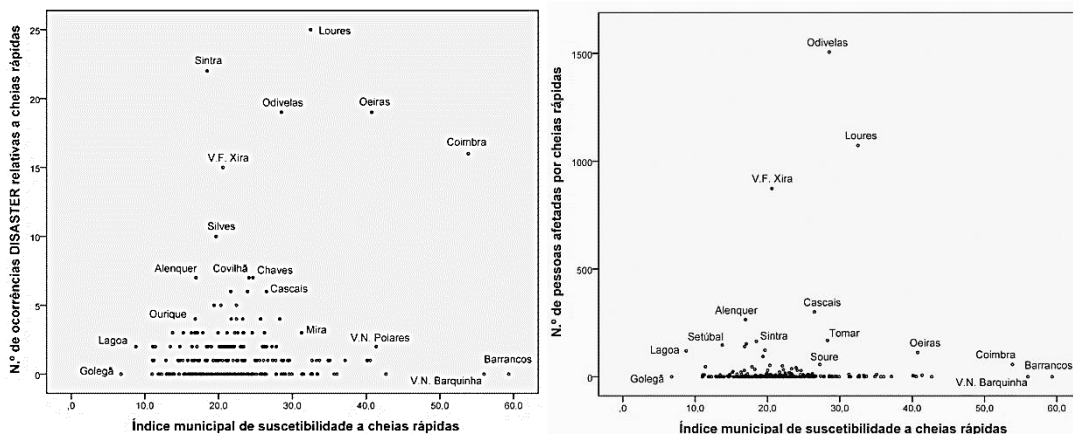


Figura 4. Relação entre o valor do IMSCR e o total de ocorrências de cheias rápidas (à esquerda) e o total de afectados por cheias rápidas (à direita), segundo a base de dados DISASTER.

#### **4. Conclusão**

Considerando os fatores condicionantes incluídos na análise, a informação produzida permite a diferenciação dos municípios de Portugal continental em termos da capacidade natural para gerar processos de cheia rápida. Com efeito, fatores como o escoamento acumulado, o escoamento anual médio ou a densidade de linhas de água de ordem de *Strahler*  $\geq 3$  constituem condições que influenciam a quantidade de caudal e o respetivo tempo de concentração. Por outro lado, outros fatores explicam essencialmente as áreas onde esse escoamento se acumulará: áreas com declive  $< 2^\circ$  e a existência de depósitos aluvionares. Finalmente, alguns dos fatores acima listados apresentam uma dupla função, isto é, simultaneamente identificam as áreas com maior potencial para gerar caudais elevados em curtos períodos, como igualmente identificam áreas suscetíveis de testemunhar inundações por cheia.

O índice municipal de suscetibilidade a cheias rápidas, cruzado com o registo de perdas, permite compreender até que ponto os impactos devidos a cheias rápidas têm sido controlados por estrangulamentos naturais. É igualmente importante estudar os fatores explicativos para os contextos em que, existindo elevada suscetibilidade, o registo histórico de perdas é reduzido. A análise do IMSCR com os registos de perdas associados a inundações urbanas poderá ser igualmente interessante, dada a estreita relação que existe entre aquela tipologia de inundações e o funcionamento hidrológico e hidráulico de pequenas e médias bacias hidrográficas – frequentemente impermeabilizadas e com leitos artificializados – que drenam os espaços urbanos.

A compreensão das condicionantes físicas à ocorrência de cheias rápidas é uma das componentes fundamentais para a compreensão do risco de desastres de natureza hidrogeomorfológica. À escala nacional, a definição de perfis municipais que cruzem aquele tipo de conhecimento com os forçadores climáticos, as dinâmicas de uso do solo e a exposição e vulnerabilidade do território permite o apoio à decisão em matéria de alocação de recursos para a implementação de estratégias de adaptação e mitigação do risco de cheia.

#### **Agradecimentos**

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no quadro do projeto FORLAND – Riscos hidro-geomorfológicos em Portugal: forçadores e aplicações ao ordenamento do território (PTDC/ATP-GEO/1660/2014) e pela Unidade de Investigação UID/GEO/00295/2019. S. C. Oliveira é financiado por uma bolsa de Pós-Doutoramento (SFRH/BPD/85827/2012) pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

## Bibliografia

AEA. (2017). European Union Digital Elevation Model (EU-DEM). Agência Europeia do Ambiente. Extraído de <https://land.copernicus.eu/>.

APA (2016). *Plano de Gestão dos Riscos de Inundações. Região Hidrográfica 5 - Tejo e Ribeiras do Oeste*. Lisboa: Agência Portuguesa do Ambiente.

APA (2018). SNIAmb – Sistema Nacional de Informação de Ambiente. Extraído de <https://sniamb.apambiente.pt/>.

Beck, H. E., de Roo, A., e van Dijk, A. I. J. M. (2015). Global Maps of Streamflow Characteristics Based on Observations from Several Thousand Catchments. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1478–1501. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0155.1>

DGT (2017). Carta Administrativa Oficial Portuguesa. Extraído de [http://www.dgterritorio.pt/cartografia\\_e\\_geodesia/cartografia/carta\\_administrativa\\_oficial\\_de\\_portugal\\_caop/](http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/).

DGT (2018). Catálogo de Serviços de Dados Geográficos da DGT. Direção-Geral do Território. Extraído de <http://mapas.dgterritorio.pt/geoportal/catalogo.html>.

Diéz-Herrero, A., Benito, G., ee Bodoque, J. M. (2013). Las avenidas e inundaciones históricas del Tajo en Toledo. In Iribas, B. L. ee Saavedra, A. C. (Eds.), *El río Tajo, lecciones del pasado para un futuro mejor* (pp. 185-233). Toledo: LEDORIA.

Fragoso, M., Trigo, R. M., Pinto, J. G., Lopes, S., Lopes, A., Ulbrich, S., ee Magro, C. (2012). The 20 February 2010 Madeira flash-floods: synoptic analysis and extreme rainfall assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(3), 715–730. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-715-2012>

Hipólito, J. R. ee Vaz, Á. C. (2012). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. Lisboa: Instituto superior Técnico.

Hutton, J. (1788). *A Teoria da Terra*. Edimburgo: Royal Society of Edinburgh.

Kazakis, N., Kougias, I., e Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555–563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>

Leal, M. e Ramos, C. (2013). Susceptibilidade às cheias na Área Metropolitana de Lisboa Norte. Factores de predisposição e impactes das mudanças de uso do solo. *Finisterra*, XLVIII(95), 17–40. <https://doi.org/10.18055/Finis3129>

Leal, M., Ramos, C., Pereira, S. (2018). Different types of flooding lead to different human and material damages: the case of the Lisbon Metropolitan Area. *Natural Hazards*, 91(2), 735–758. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3153-3>

Lencastre, A., Franco, F. M. (1984). *Lições de Hidrologia*. Monte da Caparica: Universidade de Lisboa.

Oliveira, J. T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M., ee Monteiro, J. (1992). Mapa geológico de Portugal, 1:500.000, 5ª edição. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.

- Patton, P.C., Baker, V.R., 1976. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research* 12, 941–952. <https://doi.org/10.1029/WR012i005p00941>
- Pereira, S., Diakakis, M., Deligiannakis, G., e Zêzere, J. L. (2017). Comparing flood mortality in Portugal and Greece (Western and Eastern Mediterranean). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22(March), 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.03.007>
- Pereira, S., Zêzere, J. L., Quaresma, I., Santos, P. P., e Santos, M. (2016). Mortality Patterns of Hydro-Geomorphologic Disasters. *Risk Analysis*, 36(6). <https://doi.org/10.1111/risa.12516>
- Ramos, C., e Reis, E. (2001). As cheias no Sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. *Finisterra*, 36(71), 61–82.
- Ramos, C. e Reis, E. (2002). Floods in southern Portugal: their physical and human causes, impacts and human response. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 7, 267–284. <https://doi.org/10.1023/A:1024475529524>
- Reis, E. (2006). *As Bacias Hidrográficas das Ribeiras da Serra de Grândola: Dinâmica Hidrológica e Factores Condicionantes*. Tese de doutoramento em Geografia (espec. Geografia Física). Lisboa: Departamento de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Santos, M., Santos, J. A., e Fragoso, M. (2015). Historical damaging flood records for 1871 – 2011 in Northern Portugal and underlying atmospheric forcings. *Journal of Hydrology*, 530, 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.011>
- Santos, M., Santos, J. A., e Fragoso, M. (2017). Atmospheric driving mechanisms of flash floods in Portugal. *International Journal of Climatology*, 37(Suppl. 1), 671–680. <https://doi.org/10.1002/joc.5030>
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In V. T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology* (pp. 439–476). Nova Iorque: McGraw-Hil.
- Trigo, R. M., Ramos, C., Pereira, S. S., Ramos, A. M., Zêzere, J. L., e Liberato, M. L. R. (2016). The deadliest storm of the 20th century striking Portugal: Flood impacts and atmospheric circulation. *Journal of Hydrology*, 541, 597–610. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.10.036>
- Zêzere, J. L., Pereira, S., Tavares, A. O., Bateira, C., Trigo, R. M., Quaresma, I., Santos, P. P., Santos, M., Verde, J. (2014). DISASTER: a GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. *Natural Hazards*, 72(2), 503–532. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-1018-y>
- EC e JRC (2014). Global Streamflow Characteristics Dataset (GSCD) - Mean annual streamflow per unit area (observed). Comissão Europeia, Joint Research Centre. Extraído de <http://data.europa.eu/89h/c5f5bb5c-cdd4-49c2-af5d-d1aab8c5b32b>.

