



Instituto Politécnico de Tomar

**Escola Superior de Tecnologia de Tomar e
Escola Superior Agrária de Castelo Branco**

Sérgio Paulo Caetano Rodrigues

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS SIG À AVALIAÇÃO
DA PERIGOSIDADE DE INUNDAÇÃO FLUVIAL
O CASO DA CIDADE DE TOMAR
(ESTUDOS PRELIMINARES)**

Relatório de Estágio

Orientado por:

Professora Doutora Cristina Andrade – Instituto Politécnico de Tomar
Professor Doutor Luís Santos – Instituto Politécnico de Tomar

Relatório de Estágio apresentado ao Instituto Politécnico de Tomar
para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre
em Sistemas de Informação Geográfica, Planeamento e Gestão do Território.

À minha família, por tanto.

RESUMO

As inundações são, de entre os fenómenos naturais, os mais frequentes e mortíferos tendo provocado em Portugal, mais de 537 mortos, entre 1966 e 2016. O estudo do risco de inundação desempenha um papel chave no processo de decisão da sua gestão.

Os SIG, definidos pela sua capacidade de gerir e realizar análise sobre informação espacial, são a ferramenta apropriada para processar informação, e em concreto, para a análise do risco de inundação. Foram aplicadas diversas metodologias baseadas nestes sistemas, para realizar a caracterização da bacia hidrográfica do rio Nabão e para o estudo do risco de inundação.

Foi realizado, à escala da bacia hidrográfica do rio Nabão, um estudo do risco baseado na metodologia multicritério AHP levando em consideração os parâmetros elevação, declive, tipo de solo, uso e ocupação do solo. Os resultados obtidos através de AHP, revelaram um risco muito alto em 2,2 % da bacia, sendo alto em 15%. Uma grande parte da bacia do rio Nabão apresenta risco alto e muito alto nas regiões mais baixas e em zonas povoadas com grande impermeabilização do solo.

À escala da cidade de Tomar, foram realizadas modelações hidráulicas, em *software* HEC-RAS e HEC-GeoRAS para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. A informação obtida, profundidade e velocidade da água, foi utilizada para calcular a perigosidade hidrodinâmica e, juntamente com a susceptibilidade física, também determinada, permitiu o cálculo da perigosidade total.

Os resultados permitiram concluir que grande parte da cidade de Tomar apresenta perigosidade moderada a alta. Nomeadamente, as zonas mais afectadas incluem, para todos os períodos de retorno, a margem direita do rio no qual se encontra grande parte do comércio tradicional, habitações e alguns serviços públicos.

Palavras-chave: SIG, HEC-RAS, AHP, Nabão, Perigosidade, Inundações.

ABSTRACT

Floods are among the natural phenomena, the more frequent and deadly having provoked in Portugal, more than 537 dead, between 1966 and 2016. The study of flood risk plays a key role in decision-making of its management.

GIS is defined by its ability to manage and perform analysis on spatial information, they are the appropriate tool to process information and for the analysis of flooding risk. In this study, several GIS methodologies have been applied to perform the characterization of the Nabão River basin and to assess flood risk.

At the Nabão river's catchment area scale, a risk study based on multi-criteria AHP methodology was performed considering elevation, slope, soil type, soil use and occupation as parameters. The results obtained using AHP, revealed a very high risk in 2,2% of the basin's area and high in 15%. A major portion of the Nabão River basin presents high and very high risk in the lower regions and in populated areas with great soil sealing.

At a Tomar city scale, hydraulic simulations were carried out using HEC-RAS and HEC-GeoRAS for the 10, 25, 50 and 100 years return periods. The information obtained, depth and water speed, was used to attain the hydrodynamic hazard which, along with physical susceptibility, allowed for the calculation of total hazard.

Results allowed to conclude that, most of the city presents moderate to high flood hazard. Areas more vulnerable include, for all return periods, the right bank of the River in which much of the traditional shops, housing and some public services are settled.

Keywords: GIS, HEC-RAS, AHP, Hazard, flood, Nabão.

AGRADECIMENTOS

Embora este seja um trabalho individual, para a sua realização contribuíram, de forma decisiva, várias pessoas às quais quero agradecer.

Em primeiro lugar quero agradecer à Professora Cristina Andrade e ao Professor Luís Santos por me terem proposto este trabalho, por me terem propiciado as condições para o realizar, pela disponibilidade, sugestões, incentivo, críticas e revisão do mesmo.

Agradeço também aos restantes professores do mestrado, em particular à Professora Rita, por me ter apresentado os SIG e pelo importante incentivo.

Aos meus colegas de curso, em especial ao Zé, Diana e Ana, com quem partilhei a maior parte do tempo que dediquei a este mestrado, agradeço pelo estímulo e amizade.

Ao Gustavo, Rita, Martim, Manuel e à *Malta de Tomar* por serem o contraponto necessário nesta melodia.

Agradeço, também, ao José Simões o grande apoio moral.

Finalmente agradeço à minha família, meu passado, presente e futuro, pela força e conforto que me dão constantemente.

A estas pessoas e a outras que contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

Índice

Índice de figuras	iii
Índice de tabelas	vii
Lista de siglas e acrónimos.....	ix
I. Introdução	1
1. Propósito	2
2. Plano de trabalhos	3
II. Revisão bibliográfica	4
1. Sistemas de informação geográfica e sua articulação com o tema.....	4
2. Enquadramento legal.....	6
3. Risco de inundação	9
4. Inundações.....	12
4.1 Conceito de cheia e de inundação	12
4.2 As inundações como catástrofes naturais	13
4.3 A rede hidrográfica e a bacia hidrográfica	16
4.4 O hidrograma de cheia.....	26
4.5 Características das cheias	27
4.6 Tipos de inundações, factores desencadeantes e agravantes	30
4.7 Inundações em Portugal	33
5. Estimativa do risco de inundação.....	35
5.1 Modelação hidráulica de cheias, software HEC-RAS.....	37
5.2 Perigosidade hidrodinâmica	38
5.3 Consequência sócio-económica.....	39
5.4 Matriz de risco e carta de risco de inundação.....	39
III. Caracterização do território da bacia hidrográfica do rio Nabão	42
1. Introdução	42
2. Metodologia SIG e fontes de informação	42
3. Caracterização do território.....	52

3.1	Enquadramento geográfico, classificação, forma, geometria e características do relevo	52
3.2	Hidrografia e hidrometria	67
3.3	Clima	70
3.4	Demografia	75
4.	Inundações no rio Nabão.....	75
5.	Análise preliminar do risco de inundação na BH do rio Nabão através de análise hierárquica de processos	78
IV.	Perigosidade hidrodinâmica de inundação	85
1.	Área de estudo, dados do modelo e geometria	85
2.	Processamento	90
3.	Resultados preliminares e perigosidade hidrodinâmica	94
4.	Comparação de metodologias na determinação da perigosidade	100
V.	Discussão e conclusões	106
	Referências bibliográficas.....	110
	Anexo A. Modelos de análise espacial para definição da rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica implementado (Tarboton, 2011).	124
	Anexo B. AHP - Análise hierárquica de processos	125
	Anexo C. Modelos de análise espacial utilizados para o processamento de parâmetros para a determinação da perigosidade hidrodinâmica e perigosidade total de inundação.	129
	Anexo D. Preliminary assessment of flood hazard in Nabão river basin using an Analytical Hierarchy Process	130

Índice de figuras

Figura 1. Modelo conceptual do risco. Adaptado de Panizza (cit. por Zêzere, 2007, p. 61).....	10
Figura 2. Perfil transversal de um curso de água. Esquema adaptado de Christofolletti (1981) e de Marafuz (2011).....	12
Figura 3. Catástrofes Naturais no mundo entre 1966 e 2016. Fonte: Guha-Sapir et al. (2017).	15
Figura 4. Catástrofes Naturais em Portugal entre 1966 e 2016 - Prejuízos, pessoas afectadas, vítimas mortais e eventos – proporções. Fonte: Guha-Sapir et al. (2017).	15
Figura 5. Esquema de uma bacia hidrográfica (a cheio) e de uma sua sub-bacia (a tracejado). Esquema adimensional adaptado de Guimarães (2012).	17
Figura 6. Ciclo hidrológico. Fonte: USGS (2015).	18
Figura 7. Dinâmica da água no sistema Bacia Hidrográfica. Adaptado de BBC (2017) e de Lencastre e Franco (2006).	19
Figura 8. Forma das bacias e respectivas características do escoamento após precipitação uniforme. (a) e (b) bacia alongada; (c) e (d) bacia arredondada; (e) e (f) bacia ramificada. Adaptado de Ribeiro (1987).	21
Figura 9. Padrões de rede de drenagem. (a) dendrítico, (b) paralelo, (c) treliça, (d) rectangular, (e) centrípeto Fonte: Ritter (2012).	25
Figura 10. Classificação da rede hidrográfica de uma bacia hidrográfica segundo Strahler (1964). Esquema adaptado de Kilom691 (2011).	25
Figura 11. Componentes de um hidrograma de cheia. Adaptado de Lencastre e Franco (2006).	27
Figura 12. Inundações em Portugal (não relacionadas com o mar) e suas causas. Adaptado de Ramos (2013a).	35
Figura 13. Cheias na Ilha da Madeira em 2010: a) Funchal: Transbordo ribeira João Gomes. b) Serra de Água após o temporal. Cheias em Albufeira em 2015: c) Asfalto destruído. d) Nível da água no posto da GNR.	36
Figura 14. Esquema metodológico utilizado em modelação hidráulica de inundações. Adaptado de Gonçalves (2012).	38
Figura 15. Matriz de risco de inundação (APA, 2016).	41

Figura 16. Metodologia SIG para a determinação do risco de inundação. Adaptado de APA (2016).	41
Figura 17. Modelo de análise espacial geral para definição da rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica. Elaboração própria a partir de Jenson e Domingue (1988) e Tarboton (2003, 2011).	47
Figura 18. Localização dos vectores dos perfis topográficos N/S e O/E. Elaboração própria.	50
Figura 19. Divisões administrativas na bacia hidrográfica do rio Nabão. Elaboração própria.	53
Figura 20. Enquadramento geográfico da bacia hidrográfica do Nabão. Elaboração própria.	54
Figura 21. Carta hipsométrica da BH do rio Nabão. Elaboração própria.	56
Figura 22. Distribuição de frequências altimétricas da bacia do rio Nabão. Elaboração própria.	57
Figura 23. Área ocupada por classe hipsométrica (%). Elaboração própria.	57
Figura 24. Perfis topográficos Norte/Sul e Oeste/Este ilustrativos do relevo da BH do Nabão. Elaboração própria.	58
Figura 25. Carta de declives da BH do rio Nabão. Elaboração própria.	59
Figura 26. Carta de orientações de encostas da BH do rio Nabão. Elaboração própria.	60
Figura 27. Carta geológica da BH do rio Nabão.	61
Figura 28. Carta litológica da BH do rio Nabão. Elaboração própria.	62
Figura 29. Carta de solos da BH do Nabão. Elaboração própria.	64
Figura 30. Carta de uso e ocupação do solo da BH do rio Nabão.	65
Figura 31. Área ocupada pelas classes de uso e ocupação do solo (%). Fonte: COS 2010.	66
Figura 32. Localização de linhas de referência na bacia hidrográfica do rio Nabão.	66
Figura 33. Perfil longitudinal do rio Nabão e algumas estatísticas associadas.	68
Figura 34. A rede hidrográfica da bacia do rio Babão e o ordenamento dos seus cursos de água segundo Strahler (1964). Elaboração própria.	71
Figura 35. Bacias de drenagem das Estações Hidrométricas existentes na BH do rio Nabão.	72
Figura 36. Temperaturas (°C) média, máxima e mínima mensais para o Médio Tejo no período 1971- 2000. Adaptado de IPMA (2016).	73
Figura 37. Valores médios mensais extremos de temperatura para o Médio Tejo no período 1971- 2000. Adaptado de IPMA (2016).	74

Figura 38. Diagrama ombrotérmico do Médio Tejo no período 1971-2000. Adaptado de IPMA (2016).	74
Figura 39. Demografia no território da bacia hidrográfica do rio Nabão. Elaboração própria.	76
Figura 40. Marcas de níveis históricos de inundação na cidade de Tomar: a) de 1852 na Rua Marquês de Pombal, na margem esquerda do Nabão. b) de 1909 na Rua Serpa Pinto, junto à farmácia Torres Pinheiro, na margem direita do rio. Outubro de 2017. Elaboração própria.	77
Figura 41. Inundações de 2006 em Tomar. (a) Vista para a Av. Torres Pinheiro a partir do cruzamento desta com a Av. Combatentes da Grande Guerra. (b) Vista para a Levada, a partir da Rua João Carlos Everard. Fonte: Blog Tom@r na Rede.....	78
Figura 42. Modelo conceptual utilizado para a determinação do índice de risco através de AHP. .	82
Figura 43. BH do rio Nabão: a) classes de elevação (m), b) classes de declividade (%), c) classes de tipo de solo (ordem) e uso e ocupação do solo (nível 2 da classificação COS 2010, ver Anexo B). Elaboração própria a partir de: MDT STRM J. A. Gonçalves – NASA/JPL; Carta litológica – Atlas do Ambiente; COS 2010, DGTerritório; OSMa.	83
Figura 44. Mapa do risco de inundação para a BH do Nabão. Elaboração própria.	84
Figura 45. Enquadramento da área de estudo, definida pelos limites do MDT CMT e com o rio Nabão em destaque. Elaboração própria.	86
Figura 46. Elementos geométricos da modelação hidráulica. Adicionados consecutivamente: (a) Stream Centerline, (b) Bank Lines, (c) XS Cut lines, (e) Flow paths centerlines, (f) Blocked obstructions. Elaboração própria.....	89
Figura 47. Ferramenta Geometric Data do programa HEC-RAS. Elaboração própria.	91
Figura 48. Editor gráfico de secção transversal do software HEC-RAS. Elaboração própria.	92
Figura 49. Editor (tabular) de secção transversal. Elaboração própria.....	92
Figura 50. Ferramenta de definição de perfis de escoamento do HEC-RAS. Elaboração própria...	93
Figura 51. Ferramenta RAS Mapper apresentado o perímetro de inundação para o período de retorno de T10. Elaboração própria.	94
Figura 52. Áreas de inundação para a cidade de Tomar resultantes de simulação para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. Elaboração própria.	96
Figura 53. Profundidades da água, na cidade de Tomar, resultantes de simulações de inundações para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. Elaboração própria.....	97

Figura 54. Velocidades da água, na cidade de Tomar, resultantes de simulações de inundações para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. Elaboração própria.....	98
Figura 55. Cartas de perigosidade hidrodinâmica de inundação na cidade de Tomar, resultantes de simulações de inundações para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. Metodologia APA (2016). Elaboração própria.....	99
Figura 56. Mapas de susceptibilidade física, perigosidade e perigosidade total para a simulação de inundação com um período de retorno de 10 anos, na cidade de Tomar. Elaboração própria.	103
Figura 57. Cartas de perigosidade (total) na cidade de Tomar, resultantes de simulações de inundações para períodos de retorno de 10, 205, 50 e 100 anos. Metodologia ANPC (2009) e van Westen (2004). Elaboração própria.....	104
Figura 58. Gráfico comparativo das áreas de inundação por classes de perigosidade. Elaboração própria.	106

Índice de tabelas

Tabela 1. Coeficiente de compacidade, forma da bacia hidrográfica e susceptibilidade a cheias. Fonte: Lencastre e Franco (2006).....	22
Tabela 2. Factores que condicionam a resposta da bacia hidrográfica (Lencastre e Franco, 2006). 28	
Tabela 3. Exemplos de pares de períodos de retorno e probabilidades de ocorrência.	30
Tabela 4. Classificação das cheias segundo as suas características (Ramos, 2013a).....	31
Tabela 5. Tipos e causas de inundações (Ramos, 2013a).....	32
Tabela 6. Tipos inundações fluviais, ou cheias, segundo o seu factor desencadeante (Ramos, 2013b).	32
Tabela 7. Factores agravantes das cheias (Ramos, 2005, 2013a).....	33
Tabela 8. Perigosidade hidrodinâmica da inundação (APA, 2016).....	39
Tabela 9. Consequências socioeconómicas (APA, 2016).	40
Tabela 10. Especificações dos parâmetros da projecção Transversa de Mercator utilizada no sistema ETRS89 / Portugal TM06 (DGTerritório, 2013).....	43
Tabela 11. Fontes e principais características técnicas da informação geográfica utilizada neste estudo.	46
Tabela 12. Função dos algoritmos TauDEM utilizados na definição da rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica (Tarboton, 2003, 2011).	48
Tabela 13. Relação entre declive medido em ângulos e em gradiente.	51
Tabela 14. Classificação das direcções de exposição de encosta (octantes).	51
Tabela 15. Área ocupada por classe de declives. Elaboração própria.....	58
Tabela 16. Área ocupada por sentido de exposição de encostas. Elaboração própria.....	58
Tabela 17. Características geométricas da bacia hidrográfica do Nabão.	67
Tabela 18. Distribuição do percurso do rio Nabão por concelhos.	68
Tabela 19. Principais afluentes do rio Nabão (de montante para jusante) e áreas das respectivas bacias hidrográficas.....	69
Tabela 20. Características do sistema de drenagem da bacia hidrográfica do Nabão.....	70

Tabela 21. Características geométricas de bacias de drenagem de pontos de interesse da BH do Nabão.	70
Tabela 22. Estrutura etária da população residente na BH do Nabão (INE, 2011).	75
Tabela 23. Histórico de inundações na cidade de Tomar.	77
Tabela 24. Classificação de parâmetros segundo a sua relevância no risco de inundação.	81
Tabela 25. Matriz de comparação de parâmetros de risco de inundação (AHP).	81
Tabela 26. Classes de risco de inundação.	84
Tabela 27. Caudais de ponta de cheia adoptados (FBO Consultores, 2003b).	87
Tabela 28. Relação coeficientes de rugosidade de Manning segundo COS 2010 nível 2 (Chow, 1959; Gonçalves, P., 2012).	89
Tabela 29. Informação alfanumérica associada aos elementos geométricos (HEC, 2012).	90
Tabela 30. Valores utilizados na reclassificação de parâmetros para a determinação da perigosidade (Belo, 2012).	101
Tabela 31. Valores utilizados na reclassificação dos mapas de declives e litologia (Belo, 2012).	101
Tabela 32. Classes de reclassificação da perigosidade de inundação.	103
Tabela 33. Áreas das classes de perigosidade por períodos de retorno. Elaboração própria.	105
Tabela B.1. Escala de comparação de factores. Adaptado de (Ouma e Tateishi, 2014)	126
Tabela B.2. Valor médio de IR (Saaty, 1980)	127
Tabela B.3. Legenda COS, níveis 1 e 2 (DGTerritório, 2010)	128

Lista de siglas e acrónimos

AEA – Agência Europeia do Ambiente

AHP – Análise Hierárquica de Processos

ANPC – Autoridade Nacional de Protecção Civil

ARH – Administração(ões) da(s) Região(ões) Hidrográfica(s)

CAOP – Carta Administrativa Oficial de Portugal

CGIS – Canada Geographic Information System

CIG – Ciência da Informação Geográfica

CMT – Câmara Municipal de Tomar

CNGRI – Comissão Nacional da Gestão dos Riscos de Inundações

COS – Carta de Ocupação do Solo

DGTerritório – Direcção-Geral do Território

EM-DAT – Emergency Events Database

ENDS – Estratégia Nacional de Desenvolvimento do Sustentável

FHI - Índice de Risco de Inundação (Flood Hazard Index)

IGT – Instrumentos de Gestão Territorial

INE – Instituto Nacional de Estatística

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

MDT – Modelo Digital do Terreno

NUTS – Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

PDM – Planos Directores Municipais

PGRI – Planos de Gestão dos Riscos de Inundações

PMOT – Planos Municipais de Ordenamento do Território

PNPOT – Plano Nacional da Política de Ordenamento do Território

POT – Planos de Ordenamento do Território

REN – Reserva Ecológica Nacional

SI – Sistema(s) de Informação

SIG – Sistema(s) de Informação Geográfica

SNIAmb – Sistema Nacional de Informação do Ambiente

SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission

STRM JAG – Modelo digital do terreno baseado em STRM 1 arcsec tratado e disponibilizado pelo Prof. José Alberto Gonçalves

UNDRO – United Nations Disaster Relief Co-ordinator

USD – Dólar dos Estados Unidos da América

Unidades de medida

mm – milímetros

cm – centímetros

m – metros

m² – metros quadrados

m³ – metros cúbicos

km – quilómetros

km² – quilómetros quadrados

ha – hectares

I. Introdução

O *risco de cheia e de inundações* é um dos riscos naturais mais significativos em Portugal. As *cheias e inundações* são das catástrofes naturais com maiores consequências socioeconómicas no nosso país. Entre 1996 e 2016 provocaram 597 mortos e afectaram mais de 53 mil pessoas. Tratam-se de fenómenos naturais de difícil previsão, com elevado potencial destruidor e que colocam em causa a segurança de pessoas e bens. No entanto, apesar de não poderem ser evitados, os seus efeitos podem ser minimizados (Guha-Sapir *et al.*, 2017; Sá e Vicêncio, 2011).

No relatório 01/2016, a AEA (Agência Europeia do Ambiente) afirma a existência de uma maior probabilidade de cheias para a Europa devido às alterações climáticas (EEA, 2016). Apesar de, no sul da Europa a seca, e a consequente diminuição do caudal dos rios, ser uma tendência referida, o aumento das cheias repentinas (*flash floods*) é também um cenário muito provável (EEA, 2012).

A caracterização e avaliação do risco associado às *cheias e inundações* é uma parte fundamental do processo de gestão deste risco, matéria alvo do Decreto-Lei n.º 115/2010 de 22 de Outubro. Esta norma, que transpõe para a ordem jurídica portuguesa a Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, de 23 de Outubro, aprova o *quadro para a avaliação e gestão dos riscos de inundação* e tem como objectivo *reduzir as suas consequências prejudiciais*. O Decreto-Lei estabelece a obrigatoriedade da elaboração de cartas de zonas inundáveis, de cartas de riscos de inundações e de PGRI (Planos de Gestão dos Riscos de Inundações), pelas ARH (Administrações das Regiões Hidrográficas).

A modelação hidráulica de cheias e o cálculo do risco de cheias estão inerentes à produção das cartas e planos requeridos pelo Decreto-Lei n.º 115/2010. Tratam-se de temas que reflectem problemas de índole espacial e que obrigam à integração de informação geográfica complexa de diferentes naturezas. Concretamente, será necessário considerar informação geográfica que inclui altimetria, geometria da rede hidrográfica, valores de caudais e escoamento, ocupação do solo e localização de elementos socioeconómicos sensíveis. A resolução destas questões geográficas, devido às necessidades de precisão e de celeridade

do presente, dependem da utilização de SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e, consequentemente, da ciência que lhe está subjacente, a CIG (Ciência da Informação Geográfica) (Aqualogus/Action Modulers, 2014; Goodchild, 2012).

Neste trabalho serão abordadas as inundações resultantes do transbordo dos canais normais dos cursos de água, designadas por *inundações fluviais* ou *cheias*. Será realizada uma caracterização da BH (Bacia Hidrográfica) que inclui a avaliação preliminar do risco de cheia através de análise multicritério utilizando metodologia AHP (Análise Hierárquica de Processos) suportada por técnicas de análise espacial baseadas em SIG. Será também estudada a perigosidade associada ao risco de cheia utilizando a metodologia aplicada por APA (2016) na *Elaboração de Cartografia de Risco de Inundação para Portugal Continental* e da utilização do *software* HEC-RAS^{1,2}.

1. Propósito

Neste documento apresenta-se o trabalho de estágio realizado com vista à conclusão do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica, Planeamento e Gestão do Território, leccionado pela Escola Superior de Tecnologia de Tomar do Instituto Politécnico de Tomar em parceria com a Escola Superior Agrária de Castelo Branco do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Este estágio foi realizado no Laboratório de Investigação Aplicada em Riscos Naturais - NHRC.ipt³, do Instituto Politécnico de Tomar e que tem como principais objectivos a caracterização da BH do rio Nabão e a aplicação dos SIG ao estudo preliminar do risco de cheia num troço do rio Nabão dentro da cidade de Tomar.

Nesta monografia será apresentada a teoria de suporte à análise do risco de cheia, os conceitos de *cheias* e *inundações*, o risco técnico, os SIG e a sua aplicação ao cálculo do risco de cheia, uma avaliação do risco de cheia na BH do Nabão através da AHP, uma metodologia de modelação hidráulica com recurso ao *software* HEC-RAS, uma metodologia de cálculo da perigosidade associada ao risco de inundação. A temática do risco de cheia

¹ Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System

² <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras>

³ <http://nhrc.ipt.pt/>

será também abordada do ponto de vista do ordenamento do território sendo apresentadas as principais normas legislativas existentes.

2. Plano de trabalhos

O plano de trabalhos associado à análise preliminar do risco de inundação com aplicação dos SIG, que se apresenta neste relatório nos próximos capítulos, tem por base a seguinte estrutura:

- Revisão bibliográfica,
- Caracterização do território,
 - Cálculo de índices caracterizantes da BH Nabão (Bacia Hidrográfica do Nabão),
 - Produção de cartografia temática relativa à caracterização do território,
- Análise preliminar do risco de cheia na bacia do rio Nabão através de metodologia multicritério AHP,
- Modelação hidráulica 1D de inundações no rio Nabão dentro da cidade de Tomar para os períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos,
 - Produção de cartas de perigosidade,
 - Comparação de métodos,
- Análise, discussão e conclusão.

II. Revisão bibliográfica

1. Sistemas de informação geográfica e sua articulação com o tema

A designação SIG é frequentemente associada a programas de computador que permitem o processamento de informação geográfica¹. É usual a utilização desta designação para fazer referência a *software* informático através do qual é possível gerir, analisar e visualizar informação geográfica, *software* como ArcGIS², QGIS³ e gvSIG⁴.

Esta associação é, no entanto, bastante restritiva. Os SIG são um caso particular de SI (Sistemas de Informação) e, como estes, possuem vários componentes integrados entre si onde o *software* é apenas um subsistema. Os SIG são, portanto, um sistema integrado que inclui *hardware*, *software*, organizações, utilizadores, dados⁵ e informação geográfica, clientes, fornecedores e outros sistemas de suporte aos SIG (e.g. financeiro, legal). Nesta perspectiva os SIG são um SI com capacidades específicas para dados georreferenciados, incluindo para a sua captura, armazenamento, gestão e visualização, bem como para operações de análise espacial sobre os mesmos.

Conceptualmente, no entanto, os SIG não obrigam à utilização de ferramentas informáticas. A utilização de cartografia tradicional (i.e., cartografia desenhada sobre suporte físico) e o seu processamento sistemático através de metodologias manuais é considerado um SIG por alguns autores. Actualmente, porém, a designação de SIG pressupõe, como qualquer outro SI, a utilização de computadores. (Amaral e Varajão, 2007; Fernandez *et al.*, 2004; Longley *et al.*, 1991).

Apesar da concepção moderna de SIG assentar nos sistemas computacionais, uma das primeiras análises de informação geográfica conhecida é feita manualmente sobre mapas em papel. Em 1854, Londres foi atingida por uma epidemia de cólera. O médico, Dr. John Snow,

¹ A informação geográfica, objecto dos SIG, refere-se a todo o tipo de dados que podem ser associados a um ponto no espaço e que sobre os quais é possível realizar análise espacial.

² <http://www.esri.com/arcgis>

³ <http://qgis.org>

⁴ <http://www.gvsig.com>

⁵ Dados: representação da informação que pode ser utilizada como um meio para comunicar essa informação, e.g. a localização (coordenadas) de duas cidades. Informação: interpretação dos dados, e.g. a distância entre duas cidades.

recorreu à sobreposição cartográfica da localização das mortes por cólera e das várias infraestruturas existentes na cidade, na tentativa de perceber a dinâmica da epidemia. Através deste SIG incipiente, Snow conseguiu perceber que as ocorrências de cólera se agrupavam espacialmente junto a um dos vários poços públicos de água. A descoberta desta informação conduziu ao controlo da epidemia e a uma melhor compreensão da doença.

Este trabalho, que liga a geografia e a saúde pública, marcou o início da análise espacial e mostrou as potencialidades dos SIG (Mackenzie, 2010; Musa *et al.*, 2013).

Já em meados do século XX, depois do surgimento dos computadores, e quando a capacidade de processamento o possibilitou, surgiram os primeiros SIG com características modernas. Longley (2005a) refere o CGIS (*Canada Geographic Information System*) como o primeiro SIG real. Este SIG foi desenvolvido na década de 1960 e partiu de uma ideia de Roger Tomlinson: utilizar computadores para analisar mapas tirando partido da capacidade que estas máquinas tinham de realizar tarefas simples, mas trabalhosas, de forma repetida, célere e economicamente rentável. Uma das primeiras aplicações desse sistema foi o cálculo automático de áreas (Tomlinson, 2012).

Dos anos 60 do século passado até à actualidade, a evolução dos SIG acompanhou a evolução das tecnologias de informação. Os algoritmos de análise espacial tornaram-se capazes de resolver problemas espaciais complexos e a quantidade de dados geográficos disponíveis aumentou, consequência do crescimento exponencial da capacidade de processamento e de armazenamento dos computadores (Simonite, 2016; Wing e Bettinger, 2008).

Ao longo da história dos SIG têm sido várias as definições formais propostas para os descrever. Podemos, no entanto, afirmar que uma definição unanimemente aceite incluirá um sistema informático (*hardware* e *software*), pessoas e informação geográfica e que a sua principal função é capturar, analisar, armazenar, editar e representar dados georreferenciados (Dale, 2014; Olaya, 2014).

Henriques (cit. por Julião, 2001, p. 95) sintetiza das diferentes definições de SIG afirmando: “Um SIG é um conjunto de procedimentos concebidos com o objectivo de armazenar, aceder e manipular a informação georreferenciada”, salientando, porém, que o significado de SIG pode cingir-se ao *software* informático apenas num sentido restrito. Com isto o autor reforça

a ideia de que um SIG implica algo mais do que recursos informáticos (informação georreferenciada e meios humanos) (Julião, 2001).

Em 1992, Goodchild descreve pela primeira vez a CIG (Ciência da Informação Geográfica). O autor começou por defini-la como o ramo da Ciência da Informação⁶ que trata a informação geográfica (Goodchild, 1992). A visão da comunidade científica face à CIG acabou por evoluir a par com os SIG, sendo a CIG vista actualmente como uma ciência individualizada que pode ser definida como “(...) o conjunto de disciplinas e conhecimentos que suportam os SIG, tanto no seu desenvolvimento e criação, como na sua utilização e aspectos práticos” (Olaya, 2014). A CIG é, portanto, a ciência que suporta os SIG.

A importância dos SIG é realçada por Longley (2005b) ao afirmar que “*quase tudo o que acontece, acontece algures*”. Com efeito, conhecer o local onde algo acontece é extremamente importante. Em 2014, Olaya (2014) afirmava que 70% da informação que é utilizada em qualquer âmbito está georreferenciada, número que, muito provavelmente, já peca por defeito, tendo em conta a data da afirmação e a velocidade com que se dá a evolução da tecnológica.

2. Enquadramento legal

As políticas de ordenamento do território procuram criar condições ao desenvolvimento das regiões. Este movimento constante no sentido do aumento da qualidade de vida tem consequências negativas inevitáveis. Uma delas é o aumento da exposição das populações, bens e ambiente a agentes perigosos e consequente aumento dos riscos, quer naturais, tecnológicos ou mistos (Gomes, 2013; Ramos *et al.*, 2010).

A avaliação dos riscos existentes no território torna possível a criação e implementação de medidas adequadas à minimização das suas consequências. A gestão do risco tem tido uma crescente integração na gestão do território (Fonseca, *et al.*, 2014).

No nosso país, o risco é considerado na lei que regulamenta as bases da política nacional de ordenamento do território. A Lei N.º 31/2014, de 30 de Maio, que rege as bases gerais da política pública de solos, de ordenamento do território e de urbanismo, estabelece no artigo

⁶ Goodchild (1992) define Ciência da Informação como o estudo sistemático da natureza e propriedades da informação.

2º, alínea j) que esta política pública tem, entre outros, o objectivo de “*prevenir riscos colectivos e reduzir os seus efeitos nas pessoas e bens*”. No âmbito da gestão territorial em específico, artigo 37º, na alínea k) a lei reforça o objectivo de “*(...) prevenção e redução de riscos colectivos*”.

Fruto do impacto que a ocorrência de cheias tem tido, na Europa e em Portugal, o risco de inundação tem sido abordado em diversas normas legais. Nos parágrafos seguintes serão indicadas as mais relevantes.

Uma das primeiras medidas tomadas pelo estado com relevância para o risco de inundação foi o estabelecimento do regime jurídico dos terrenos no domínio público hídrico cujo Decreto-Lei 468/71, de 5 de Novembro, veio rever, actualizar e unificar.

O Decreto-Lei n.º 89/87, de 26 de Fevereiro, aborda directamente a problemática das cheias estabelecendo medidas de protecção às zonas por elas ameaçadas. Tratou-se da “*primeira ponte legal entre a existência e delimitação territorial do risco de cheia e a ocupação e uso futuro dessas áreas, quando lidas numa estratégia de planeamento, de ordenamento e gestão territorial*” (ANPC, 2016).

O Decreto-Lei n.º 364/98, de 21 de Novembro, estipula que os PMOT (Planos Municipais de Ordenamento do Território) dos municípios com núcleos urbanos atingidos por cheia deveria integrar cartas de zonas inundáveis.

A Lei n.º 54/2005, de 15 de Novembro, estabelece a titularidade dos recursos hídricos.

A Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, aprova a Lei da Água, estabelecendo as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas. Esta lei transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro (Directiva Quadro da Água). A Lei da Água tem vindo a sofrer actualizações e está actualmente na 5ª versão.

A Lei n.º 58/2007, de 4 de Setembro, aprova o PNPOT (Plano Nacional da Política de Ordenamento do Território). Tratou-se do primeiro instrumento de gestão territorial moderno que considerou, expressamente, os riscos e as vulnerabilidades territoriais na definição do modelo territorial. O PNPOT considerou um problema a ocupação e

transformação do território sem ter em conta os perigos existentes, entre os quais encontra-se referido o perigo de cheias e inundações (Julião *et al.*, 2009).

A Resolução do Conselho de Ministros n.º 109/2007, de 20 de Agosto, aprova a ENDS (Estratégia Nacional de Desenvolvimento do Sustentável) que no seu ponto 37 considera a melhoria da prevenção dos impactos destrutivos de risco sísmico e de inundações através do lançamento de programas de investigação. No ponto 39 menciona a realização de zonamento das áreas ameaçadas por cheias e inundações, a definição dos usos compatíveis com estas áreas e a inclusão da delimitação destas áreas, as medidas de salvaguarda, de prevenção e mitigação destes riscos nos POT (Planos de Ordenamento do Território).

O Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, que transporta para a ordem jurídica portuguesa a Directiva n.º 2007/30/CE, de 23 de Outubro, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro (Directiva Inundações), estabelece um quadro nacional para a avaliação e gestão dos riscos de inundações que tem como objectivo reduzir as consequências prejudiciais das inundações. Estabelece que “(...) *será avaliado o risco de inundação e respectivas medidas suplementares para a sua mitigação (...)*”, determinando a elaboração de cartas de zonas inundáveis e de cartas de riscos de inundações e de PGRI. Esta norma legal estabelece ainda a criação da CNGRI (Comissão Nacional da Gestão dos Riscos de Inundações) cuja função é acompanhar a implementação da Directiva n.º 2007/30/CE, de 23 de Outubro. É de salientar que o Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, estabelece a forma de articulação da informação produzida com os IGT (Instrumentos de Gestão Territorial) e a REN (Reserva Ecológica Nacional) promovendo uma propagação e entrosamento das medidas implementadas pelos diversos planos que constituem os IGT e pela REN, indicando a conformidade com os PGRI. O principal objectivo dos PGRI é a redução dos riscos de inundações, melhorando a percepção do risco de inundação e das estratégias de actuação na população. Aumentar o conhecimento para melhorar a gestão do risco de inundação e a capacidade de previsão perante situações de cheias e inundações de forma a promover o correcto ordenamento do território e a gestão da exposição nas áreas inundáveis. Aumentar a resiliência diminuindo a vulnerabilidade dos elementos situados nas áreas de possível inundação e manter o bom estado das massas de água.

No âmbito do enquadramento legal é ainda importante salientar a oportunidade que as revisões dos PDM (Planos Directores Municipais) representam para implementar medidas de minimização de risco de inundação (e de outros). Nesta fase, é possível incluir cartografia de risco de inundação de forma a evitar a ocupação de áreas territoriais de maior susceptibilidade.

3. Risco de inundação

Risco é o "*efeito da incerteza nos objectivos*" (ISO Guide 73:2009 cit. por ANPC, 2016, p. 4). Esta é uma definição geral de risco segundo normas internacionais que referem ainda que este efeito "*(...) poderá ser um desvio, positivo ou negativo, relativamente ao esperado.*" Segundo a mesma fonte podemos perceber que o risco é de natureza tão diversa quanto os objectivos das acções do ser humano. A incerteza advém da deficiência de informação relacionada com o grau de compreensão do fenómeno. Um exemplo de um objectivo é a segurança que se pretende ter face às inundações, quando se trata do seu risco.

Uma definição mais restrita de risco, no contexto do planeamento de emergência de protecção civil, é dada pela ANPC (Autoridade Nacional de Protecção Civil) (2009): "*(...) risco é definido como a probabilidade de ocorrência de um processo (ou acção) perigoso e estimativa das suas consequências sobre pessoas, bens e ambiente.*"

Risco e *perigo* são termos muitas vezes utilizados como sinónimos. É importante distingui-los. Julião *et al.* (2009) define *perigo* como um processo susceptível de criar prejuízos identificados. O perigo existe isoladamente. Para que exista risco é necessário que exista valor exposto a esse perigo. Tomando como exemplo o risco de inundação, o perigo é a inundação. Existe risco apenas se existirem vidas, bens ou outros elementos com valor expostos a esse perigo, passíveis de se danificar ou perder caso o perigo ocorra.

O *risco* é tratado como uma área científica há menos de quatro décadas. Da reunião, em 1979, de um Grupo de Especialistas em Análise de Vulnerabilidade, organizada pela UNDRO (United Nations Disaster Relief Co-ordinator), foi elaborado um modelo conceptual de risco, Figura 1, e foram definidos oficialmente termos e conceitos integrados nesse modelo, dos quais se expõem os principais: (1) *perigosidade* – traduz a probabilidade de ocorrência de um evento perigoso, passível de quantificação probabilística quanto à ocorrência e magnitude; (2) *elementos em risco* – vidas humanas, bens pessoais, materiais

ou ambientais susceptíveis de serem atingidos ou danificados pelo impacto resultante do evento perigoso e que são portadores de valor; (3) *vulnerabilidade* – grau expectável de perda dos elementos expostos quando atingidos pelo evento perigoso; (4) *risco* – possibilidade de ocorrência de um evento perigoso e a quantificação das suas consequências raras, económicas ou na segurança das pessoas (Aven, 2016; UNDRO, 1980; Zêzere *et al.*, 2005).

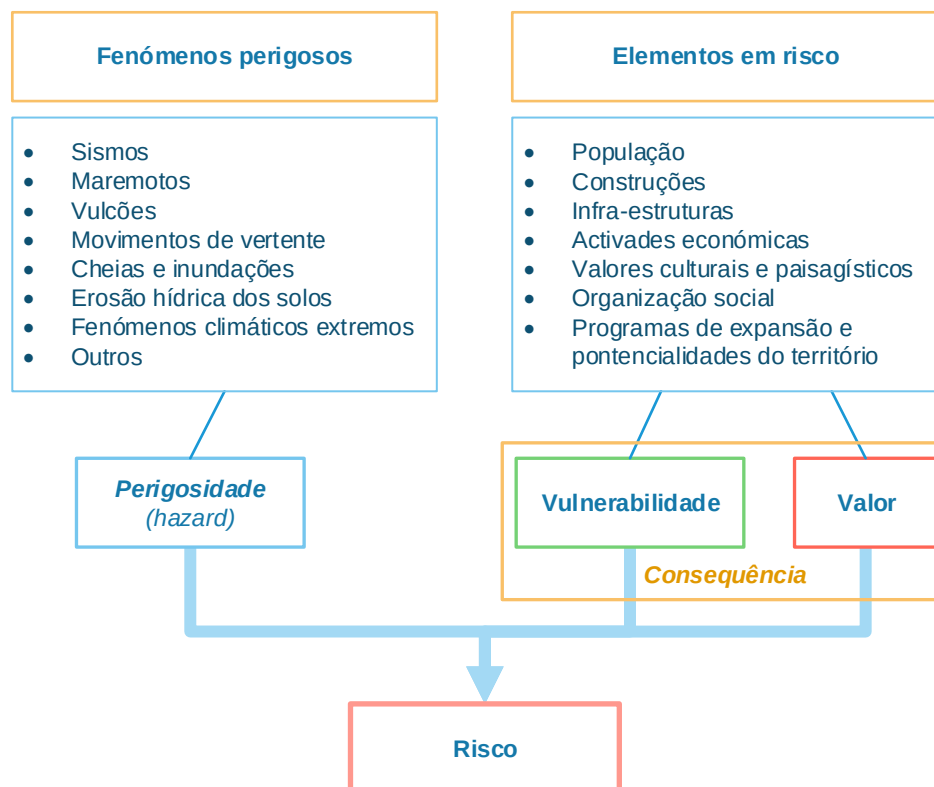


Figura 1. Modelo conceptual do risco. Adaptado de Panizza (cit. por Zêzere, 2007, p. 61).

A metodologia para a determinação do grau de risco varia conforme os autores e o caso de estudo. Julião *et al.* (2009) define matematicamente o risco através da expressão (1):

$$Risco = Perigosidade \times Consequência \quad (1)$$

com,

$$Consequência = Vulnerabilidade \times Valor \quad (2)$$

A *perigosidade* traduz a probabilidade de ocorrência de um evento perigoso com determinada severidade, para uma determinada área e num período de tempo. Sendo *severidade* a capacidade que o evento perigoso tem de realizar danos e é função da sua *magnitude*. A *consequência* ou *dano potencial* indica o dano aos elementos expostos, caso ocorra um evento com determinada *severidade*. É o resultado do produto da *vulnerabilidade*, o grau de perda dos elementos expostos, e do *valor* ou *exposição* dos mesmos (Almeida, 2007; Julião *et al.*, 2009).

Devido à complexidade dos fenómenos perigosos e consequente dificuldade na sua previsão, é considerada adequada a utilização de metodologias qualitativas para a determinação do risco. Um exemplo deste tipo de metodologias é a utilização de *matrizes de risco* nas quais são definidas escalas qualitativas para relacionar as componentes do risco. Métodos qualitativos podem ser utilizados em conjunto com métodos quantitativos na mesma metodologia por forma a otimizar a utilização da informação disponível (ANPC, 2016).

Quanto à natureza do fenómeno perigoso, a ANPC (2009) classifica o risco em três grupos:

- Riscos Naturais - resultantes do funcionamento dos sistemas naturais (e.g. sismos, movimentos de massa em vertentes, erosão litoral, cheias e inundações, ondas de calor, vagas de frio).
- Riscos Tecnológicos - resultantes de acidentes decorrentes da actividade humana (e.g. cheias e inundações por ruptura de barragens, acidentes no transporte de mercadorias perigosas).
- Riscos Mistos - resultantes da combinação do funcionamento dos sistemas naturais com a actividade humana (e.g. incêndios florestais).

O risco de inundação, um risco natural, de acordo com o Decreto-Lei 115/2010, de 22 de Outubro, é "*(...) a combinação da probabilidade de inundações, tendo em conta a sua magnitude, e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural, as infraestruturas e as actividades económicas, sendo as suas consequências prejudiciais avaliadas através da identificação do número e tipo de actividade afectada, podendo por vezes ser apoiada numa análise quantitativa*".

O fenómeno inundação é, portanto, o perigo associado ao risco de inundação e é o objecto de análise do próximo capítulo.

4. Inundações

Para trabalhar o risco de inundação é fundamental conhecer a base teórica que enquadra o seu fenómeno. Assim, neste capítulo descreve-se o impacto das inundações enquanto catástrofes, quer em Portugal quer a nível mundial, e expõem-se os conceitos básicos de hidrologia⁷ que possibilitam a contextualização do tema trabalhado: conceitos de cheias e inundação, características das cheias, classificação de inundações e um enquadramento das inundações em Portugal.

4.1 Conceito de cheia e de inundação

O conceito de cheia varia com o contexto e com o autor. Strahler (1975) afirma ocorrer uma cheia quando a descarga de um rio não pode ser contida dentro das margens do seu canal normal, menor ou ordinário, Figura 2, e a água passa a ocupar os terrenos adjacentes.



Figura 2. Perfil transversal de um curso de água.
Esquema adaptado de Christofolletti (1981) e de Marafuz (2011).

Por outro lado, Rocha (1995) afirma que “*O conceito de cheia está associado à ocorrência de um valor muito elevado de caudal num curso de água, resultante da ocorrência de precipitação intensa*” e que, apenas quando existe transbordo do leito normal ocorre inundação. Segundo este autor, o leito normal tem a capacidade de escoar os caudais de cheia.

Lencastre e Franco (2006) definem cheia, sob o ponto de vista da hidrologia, como um fenómeno consequente da ocorrência de precipitação que dá origem a escorrência superficial directa que se traduz num hidrograma de cheia. Zêzere *et. al.* (2005) e Ramos (2013a) definem cheia, numa perspectiva geográfica, como fenómenos hidrológicos extremos, temporários e de frequência variável provocados por precipitações elevadas, fusão de neve

⁷ Ciência que estuda a água e a sua dinâmica no ambiente (Baker, 2015).

ou de gelo ou outros factores que conduzam ao aumento do caudal dos cursos de água levando ao transbordo do seu leito ordinário e consequente inundação das margens e áreas adjacentes.

Ao conceito de cheia surge associado o conceito de inundação. Muito embora sejam utilizados como sinónimos, não o são: uma inundação ocorre sempre que há submersão de uma área que, usualmente, se encontra emersa. Uma inundação não é necessariamente provocada por uma cheia. No entanto, segundo Ramos (2013a) e Strahler (1975) uma cheia origina, invariavelmente, uma inundação. Tendo em conta esta distinção, o termo *cheia* é equivalente à designação *inundação fluvial*.

Embora o conceito de cheia varie, o de inundação é em boa medida consensual e encontrasse definido na legislação portuguesa pelo Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, que transpõem para a ordem jurídica nacional a Directiva 2007/90/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia – Directiva Inundações, da seguinte forma:

"(...) entende-se por: (...) b) «Inundação» a cobertura temporária por água de uma parcela do terreno fora do leito normal, resultante de cheias provocadas por fenómenos naturais como a precipitação, incrementando o caudal dos rios, torrentes de montanha e cursos de água efémeros correspondendo estas a cheias fluviais, ou de sobrelevação do nível das águas do mar nas zonas costeiras;"

Esta definição de inundações surge no âmbito da avaliação e gestão dos riscos de inundações e incorpora as fluviais e as costeiras.

4.2 As inundações como catástrofes naturais

De entre os desastres naturais que ocorrem a nível mundial, as cheias e inundações são os mais frequentes e dos mais mortíferos. De acordo com a base de dados internacional de catástrofes EM-DAT⁸ (*Emergency Events Database*) (Guha-Sapir *et al.*, 2017), entre 1966 e 2016 ocorreram 4529 eventos de cheias e inundações dos quais resultaram 303 655 mortos,

⁸ www.emdat.be; define catástrofes, ou desastres, como eventos que cumpram pelo menos um dos seguintes critérios: 10 ou mais vítimas mortais, 100 ou mais de pessoas afectadas, declaração de estado de emergência, pedido de ajuda internacional.

cerca de 3,6 mil milhões de pessoas afectadas e prejuízos económicos na ordem dos 715 mil milhões de USD. No mesmo período, as cheias e inundações foram o tipo de catástrofe mais frequente com mais de 34% do número total de ocorrências e foi também o que afectou o maior número de pessoas, sendo responsável por quase metade do total de pessoas fustigadas por catástrofes naturais (Guha-Sapir *et al.*, 2017; Ramos, 2005).

Segundo Guha-Sapir *et al.* (2017), entre 1966 e 2016, ocorreram em Portugal 14 eventos catastróficos de cheias e inundações que provocaram 597 mortos, afectaram mais de 53 mil pessoas e provocaram cerca 1,3 mil milhões de EUR em prejuízos. No mesmo intervalo de tempo, as cheias e inundações foram as catástrofes naturais com maior número de ocorrências em Portugal, correspondendo a cerca de 39% da totalidade dos desastres naturais. Foram também, logo depois das ondas de calor, as que fizeram mais vítimas mortais. As cheias e inundações foram ainda a segunda maior catástrofe natural em número de pessoas afectadas e a que causou maiores danos económicos nesse período, logo depois dos fogos florestais (Guha-Sapir *et al.*, 2017). As figuras 3 e 4 têm por base dados EM-DAT sobre catástrofes ocorridas entre os anos de 1966 e 2016, no mundo e em Portugal, respectivamente. Nelas mostram-se as proporções de cada catástrofe natural face ao total de catástrofes naturais em termos de ocorrências, número de vítimas mortais, número de pessoas afectadas e valor dos danos ocorridos.

A perda de vidas humanas é a mais grave consequência da ocorrência de cheias e inundações. No entanto, as consequências destes desastres naturais podem afectar, directa ou indirectamente, as populações de forma diversa. De entre elas incluem-se (Ramos, 2005):

- destruição de culturas e degradação ou perda dos solos agrícolas,
- perda de animais por afogamento,
- corte de vias de comunicação,
- corte no abastecimento de água, electricidade e outros bens,
- submersão de localidades e monumentos,
- destruição de estruturas hidráulicas,
- desalojamento de populações,
- possibilidade de proliferação de doenças e epidemias.

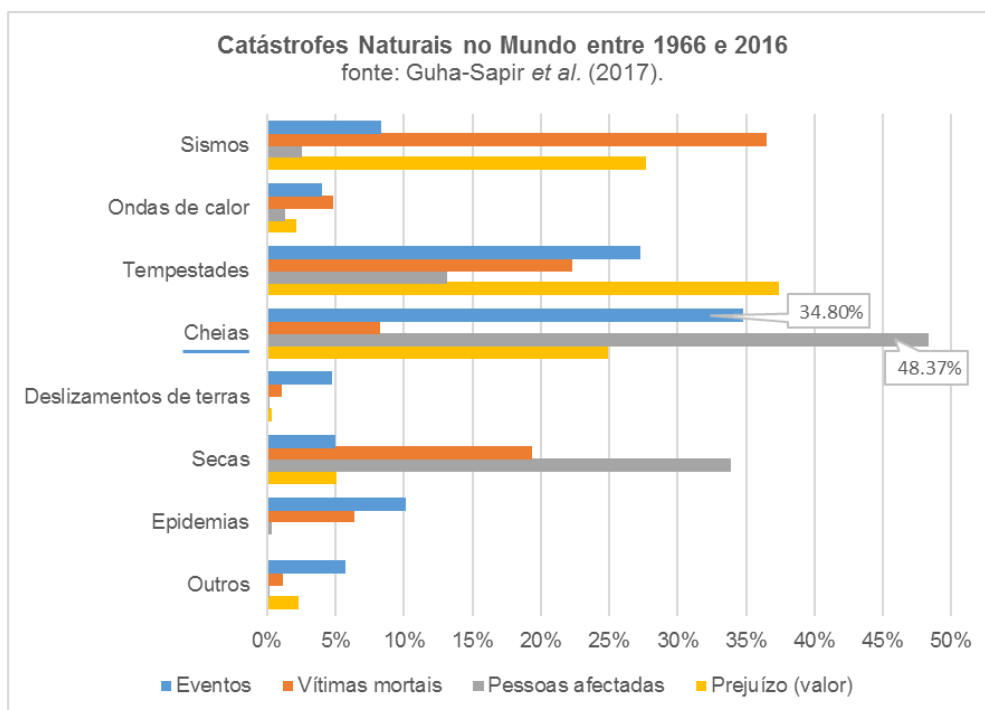


Figura 3. Catástrofes Naturais no mundo entre 1966 e 2016.
Fonte: Guha-Sapir *et al.* (2017).

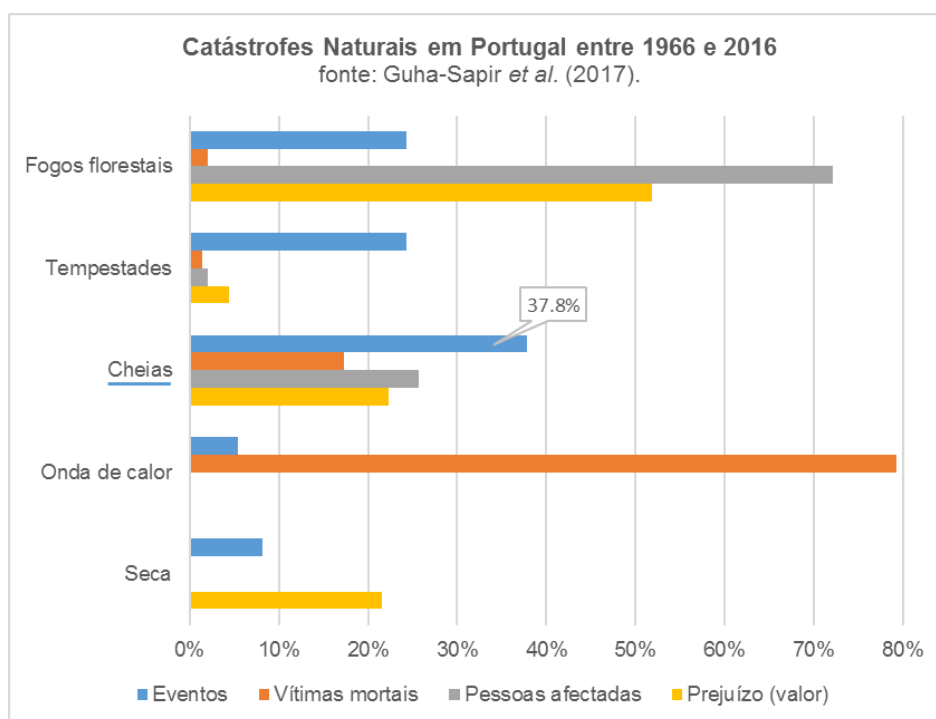


Figura 4. Catástrofes Naturais em Portugal entre 1966 e 2016 - Prejuízos, pessoas afectadas, vítimas mortais e eventos – proporções. Fonte: Guha-Sapir *et al.* (2017).

4.3 A rede hidrográfica e a bacia hidrográfica

4.3.1 Definições

A designação *rede hidrográfica*, ou *rede de drenagem*, refere-se a um conjunto de cursos de água, interligados entre si, que conduzem os seus efluentes para um ponto comum. Uma *bacia hidrográfica*, ou *bacia de drenagem*, corresponde à área geográfica drenada por uma rede hidrográfica. A *secção de referência da bacia*, o ponto comum para onde convergem os efluentes da sua rede hidrográfica, determina cada bacia. Lencastre e Franco (2006) definem bacia hidrográfica como:

(..) uma área definida topograficamente, drenada por um curso de água ou por um sistema interligado de cursos de água tal que todos os caudais efluentes sejam descarregados por uma única saída (secção de referência da bacia).

É importante referir que esta definição apenas considera a separação de águas escoadas superficialmente. Para além desta componente do escoamento existe o escoamento subterrâneo cuja linha de separação de águas habitualmente não coincide com a linha de separação de águas topográfica. A separação freática é difícil de estabelecer, razão pela qual normalmente não se considera para a delimitação da bacia hidrográfica (Lencastre e Franco, 2006; Ribeiro, 1987).

Na figura 5 pode observar-se o esquema de uma bacia hidrográfica onde se destaca a secção de referência para a qual contribui toda a área dentro do contorno da bacia. Este é definido pela linha de separação de águas ou linha de cumeada, que separa a bacia hidrográfica das bacias adjacentes (LNEG, 2017). Na Figura 5 encontra-se ainda uma sub-bacia definida pela sua secção de referência.

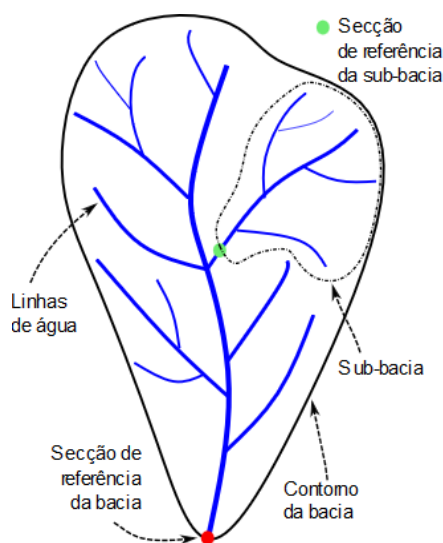


Figura 5. Esquema de uma bacia hidrográfica (a cheio) e de uma sua sub-bacia (a tracejado).
Esquema adimensional adaptado de Guimarães (2012).

Do ponto de vista da topografia, as linhas de separação de águas, linhas de festo ou linhas de cumeadas constituem as arestas dos *tergos* formados pelas encostas convexas. Os *tergos* opõem-se aos *vales* que são constituídos pelas encostas côncavas cujas arestas se denominam talvegues, linhas de córrego ou linhas de reunião de águas (Sousa *et al.*, 2012).

4.3.2 A bacia hidrográfica e o ciclo hidrológico

A água existente no planeta encontra-se em movimentação contínua e cíclica, processo conhecido por ciclo da água ou ciclo hidrológico. Durante este ciclo ocorrem alterações quer de localização quer de estado físico da água. O percurso da água através de uma bacia hidrográfica é parte do ciclo hidrológico, aqui descrito de forma sucinta.

Por acção do Sol, motor deste ciclo, ocorre evaporação da água líquida nos oceanos, mares, lagos e outras superfícies de água. O Sol promove também a evaporação de água contida nas plantas e nos solos – evapotranspiração. Esta água ascende na atmosfera onde eventualmente fará parte de nuvens. O próximo passo do ciclo hidrológico será a precipitação. Deste modo, a água precipita sobre a hidrosfera, ou criosfera, ou sobre a superfície terrestre retornando eventualmente aos oceanos através do escoamento superficial e/ou subterrâneo de onde evaporará voltando à atmosfera (Figura 6).

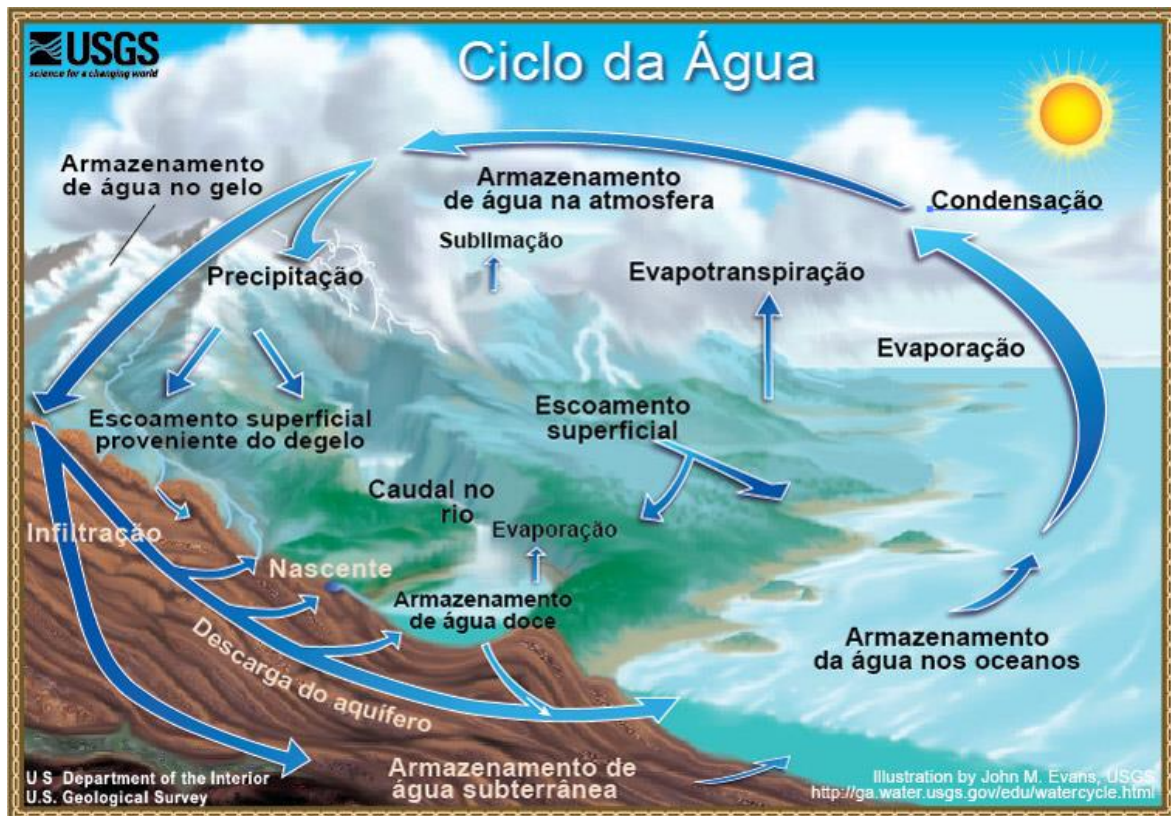


Figura 6. Ciclo hidrológico. Fonte: USGS (2015).

4.3.3 Dinâmica da água numa bacia hidrográfica

A água precipitada da atmosfera sobre um território pode ter vários destinos. Pode ser interceptada pela vegetação e outros seres vivos, pode ser interceptada por edifícios ficando retida ou pode voltar à atmosfera por evaporação. A precipitação que não é interceptada atinge a superfície terrestre onde se pode evaporar, infiltrar no solo ou permanecer retida em depressões. Quando a precipitação que ocorre sobre determinada área é maior que a capacidade de retenção destes sistemas, ocorre o escoamento superficial da quantidade de água excedente, segundo a lei da gravidade. A água escoada superficialmente seguirá até à linha de água mais próxima que, por sua vez, se ligará a linhas de água de maior secção até desaguar no mar. As bacias endorreicas são excepção a esta regra (Lencastre e Franco, 2006).

A Figura 7 ilustra, de forma simplificada, a dinâmica da água numa bacia hidrográfica. A bacia é uma estrutura tridimensional com um volume limitado. É, no entanto, uma estrutura aberta, recebendo água através da precipitação, perdendo água através da secção de

referência ou através da evapotranspiração. Dentro do sistema bacia hidrográfica, existe movimentação e armazenamento de água.

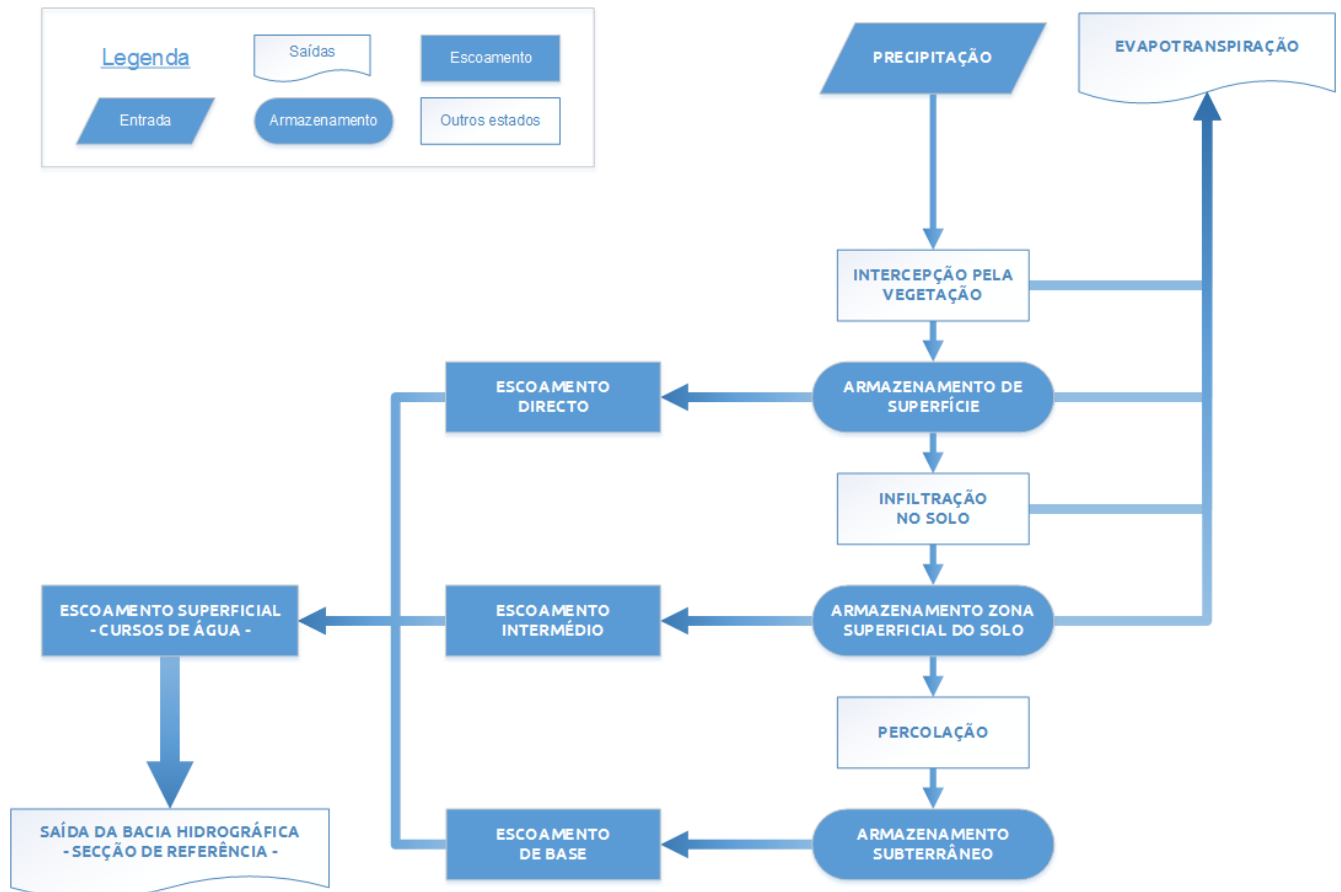


Figura 7. Dinâmica da água no sistema Bacia Hidrográfica.
Adaptado de BBC (2017) e de Lencastre e Franco (2006).

O escoamento superficial é um dos fenómenos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica com maior relevância no estudo das cheias. Este escoamento resulta de um ou de vários componentes: o escoamento directo que corresponde à fracção da precipitação que escorre superficialmente uma vez saturado; o escoamento intermédio resultante da movimentação de água acumulada na zona superficial do solo devido à impermeabilidade das zonas mais profundas do solo ou a sistemas de drenagem artificiais enterrados e termina pouco depois do escoamento directo; o escoamento de base ou subterrâneo que resulta da fracção a precipitação que se infiltrou (recarga dos aquíferos) e acumulou profundamente nas formações geológicas e posteriormente aflora à superfície (descarga dos aquíferos: nascentes e alimentação intermédia dos cursos de água); e o escoamento resultante da precipitação

sobre a rede hidrográfica que corresponde à precipitação que cai directamente na rede hidrográfica e que é proporcional à densidade desta na bacia. Este escoamento e o escoamento intermédio são geralmente menos significativos para o escoamento superficial total (Chow *et al.*, 1988; Lencastre e Franco, 2006).

4.3.4 *Classificação de bacias hidrográficas*

As bacias hidrográficas podem ser classificadas de acordo com o tipo de drenagem da seguinte forma (Ramos, 2005; Rodrigues *et al.*, 2011):

- I. *Bacias exorreicas*, quando a drenagem é feita, directa ou indirectamente para o oceano.
- II. *Bacias endorreicas*, cuja água é drenada para o interior dos continentes. A água acumula-se em lagos ou depressões interiores.
- III. *Bacias criptorreicas*, em que a água escorre através de sumidouros, cavernas ou fendas e se acumula lagos subterrâneos.
- IV. *Bacias arreicas*, quando a água desaparece por evaporação ou infiltração.

4.3.5 *A forma da bacia e o escoamento*

A forma da bacia, observada em planta, influencia o caudal do curso de água principal e a propensão a cheias nesse canal. Uma bacia com forma alongada (Figura 8a) possui um único rio principal com grande extensão contribuindo, cada um dos seus afluentes, com uma pequena parcela do caudal total. A largura da bacia é bastante mais pequena que o seu comprimento. A queda de precipitação intensa na área desta bacia origina um pico de caudal, distribuído por um espaço de tempo considerável (Figura 8b). Numa bacia semelhante à da Figura 8c, com forma arredondada, onde a maioria das linhas de água tem a mesma importância, a queda de precipitação intensa por toda a bacia provocará um escoamento concentrado no tempo (Figura 8d). Esta concentração originará níveis de água mais altos comparativamente a uma bacia do tipo alongada com a mesma área e sob as mesmas condições de precipitação. As bacias formadas por bacias parciais alongadas (Figura 8e) são designadas por bacias ramificadas. Em caso de queda de precipitação intensa e uniforme pela área da bacia, cada bacia parcial contribuirá com o seu pico de caudal em tempos diferentes, consoante a distância da sua inserção no curso de água principal originando vários picos de caudal na sua secção de referência (Figura 8f).

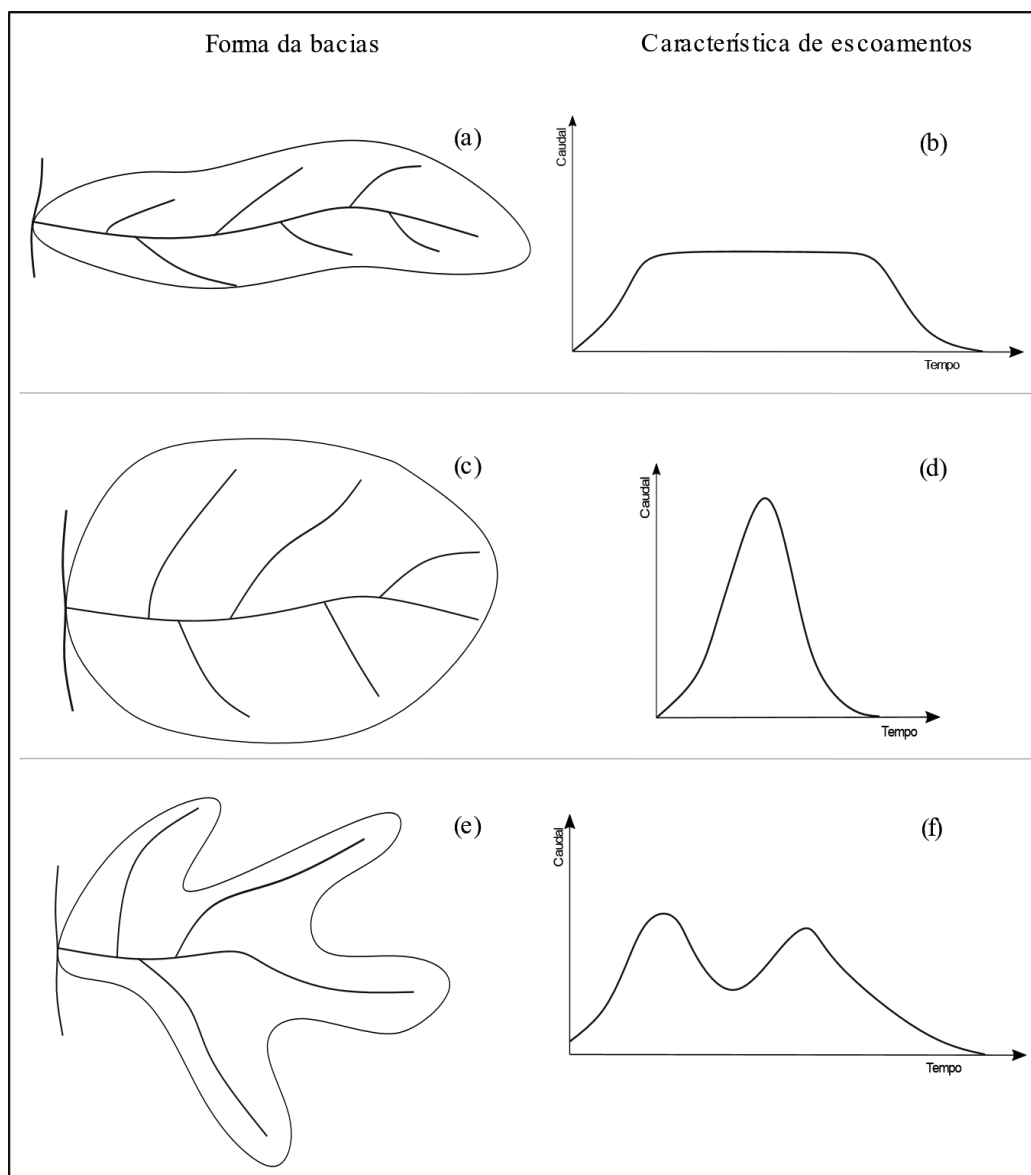


Figura 8. Forma das bacias e respectivas características do escoamento após precipitação uniforme. (a) e (b) bacia alongada; (c) e (d) bacia arredondada; (e) e (f) bacia ramificada. Adaptado de Ribeiro (1987).

4.3.6 Geometria e características de relevo das bacias hidrográficas

A importância da definição das características geométricas de uma bacia hidrográfica prende-se com a possibilidade de inferir, através destas, a susceptibilidade a cheias que a mesma terá.

A primeira característica a ter em conta é a área da bacia. Esta área tem relação directa com o volume total de água que é recebida pela bacia hidrográfica. Para caracterizar a forma como esta água é drenada em termos de concentração do escoamento e propensão a

fenómenos de cheias utilizam-se o factor forma de Horton e o índice de compacidade ou índice de Gravelius (Lencastre e Franco, 2006).

O *factor forma de Horton* (F) de uma bacia hidrográfica compara-a com um rectângulo de igual área e varia entre 0,1 (bacia alongada) e 0,754 (bacia arredondada). Obtêm-se relacionando largura média da bacia com o seu comprimento. Considerando que a largura média é a razão entre a área da bacia (A) e o seu comprimento (C) podemos calcular (F) através da expressão (3). Quanto menor o valor do factor forma, mais estreita e longa será a bacia e menor tendência terá para ocorrência de cheias no seu território. Quanto maior, maior a tendência para ocorrerem picos de escoamento de curta duração (Lencastre e Franco, 2006).

$$F = \frac{A}{C^2} \quad (3)$$

A expressão (4) exprime o *Coefficiente de Compacidade* ou *Índice de Gravelius* (K). Este compara bacias com um círculo de igual área. Obtêm-se através da razão entre o perímetro (P) da bacia e da sua área (A).

$$K = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

Quando K assume um valor igual a 1 trata-se de uma bacia completamente circular, o mais compacta possível e com maior tendência para cheias. O valor deste índice afasta-se da unidade proporcionalmente ao alongamento desta (Guimarães, 2012; Lencastre e Franco, 2006). Na Tabela 1 apresenta-se a relação entre o coeficiente de compacidade, a forma da bacia e a susceptibilidade a cheias.

Tabela 1. Coeficiente de compacidade, forma da bacia hidrográfica e susceptibilidade a cheias.
Fonte: Lencastre e Franco (2006).

Coeficiente de compacidade	Forma da bacia hidrográfica	Susceptibilidade a cheias
1,00 – 1,25	Redonda a oval redonda	Alta
1,25 – 1,50	De oval redonda a oval oblonga	Média
1,50 – 1,75	De oval oblonga a rectangular oblonga	Baixa

A *curva hipsométrica* de uma bacia hidrográfica a área da bacia que fica acima de determinada cota dessa bacia. No mesmo gráfico podem ainda ser representadas a área da bacia por classes hipsométricas ou as frequências altimétricas. Estas representações permitem-nos perceber que intervalos de altitude estão mais representados na bacia.

A *altitude média* da bacia ($\bar{Z}$) obtém-se através da altitude média (Z_i) e da área (A_i) de duas curvas de nível consecutivas e da área total da bacia (A), de acordo com a expressão (5) (Lencastre e Franco, 2006).

$$\bar{Z} = \frac{\sum(Z_i \cdot A_i)}{A} \quad (5)$$

O *perfil longitudinal do curso de água* é também uma ferramenta importante para a compreensão do relevo da bacia hidrográfica. Este perfil mostra a variação da altitude em função da distância à foz do curso de água. Nele podem ser representados os pontos intersecção de afluentes, zonas urbanas, desníveis acentuados (e.g. barragens, quedas de água), entre outros pontos de interesse. A divisão do desnível, entre nascente e foz, pelo comprimento total corresponde ao *declive médio do curso de água*.

4.3.7 A rede hidrográfica

Constância do escoamento

Tendo em conta o regime de escoamento, os cursos de água podem ser classificados em *perenes*, *intermitentes* e *efêmeros*. Os cursos de água *perenes* apresentam escoamento permanente, mesmo durante as secas mais severas. O nível do lençol freático está sempre acima do leito do curso de água. São *intermitentes* aqueles cursos de água que possuem escoamento apenas nas estações húmidas, ou nas estações secas durante, ou logo após, as chuvadas. O lençol freático alimenta o curso de água apenas nas estações húmidas. Dizem-se *efêmeros* os cursos de água que apenas transportam escoamento superficial durante ou após a ocorrência de precipitação, o lençol freático nunca sobe acima do leito do curso de água, pelo que nunca são alimentados por escoamento (Lencastre e Franco, 2006).

Padrão da rede hidrográfica

A topologia e a geologia dos solos onde se insere determinada rede hidrográfica determina a localização dos diversos cursos de água que a constituem. Na vista em planta, estes padrões apresentam formas e texturas que permitem agrupar as bacias em diversos tipos. Apresentamos de seguida os principais tipos de bacias segundo o padrão que apresentam (Ritter, 2012; Rodrigues *et al.*, 2011).

As redes de drenagem mais comuns são do tipo *dendrítico* (Figura 9a). São típicas de áreas com solos geologicamente homogêneos. Nas bacias de drenagem dendríticas os tributários inserem-se no rio principal em ângulos agudos.

As bacias de *padrão de drenagem paralelo* (Figura 9b) ocorrem em terrenos com declives elevados ou em zonas em que a geologia subjacente apresente bandas longitudinais. Neste tipo de bacias os cursos de água tendem a estenderem-se paralelamente aos de que são tributários.

As *bacias de padrão em treliça* (Figura 9c) ocorrem tipicamente em zonas onde existem elevações do tipo sinclinal. Tratam-se de zonas onde os estratos rochosos sofreram forças que provocaram dobras horizontais provocando o aparecimento de terços e de vales. A forma destes vales leva a que existam pequenos tributários e que estes encontrem os canais principais em ângulos próximos dos 90°.

As zonas onde ocorreram falhas geológicas são aquelas onde existem as *bacias de padrão rectangular* (Figura 9d). Nestas bacias os cursos de água tendem a fazer curvas pronunciadas.

As *bacias de padrão radial* ocorrem em torno de um ponto com elevação pronunciada. É o tipo de bacia que existe tipicamente em redor de um vulcão.

Por oposição esta última existe a *bacia de padrão centrípeto* (Figura 9e). Nesta bacia os cursos de água convergem para uma depressão central. É um padrão típico de bacias endorreicas.

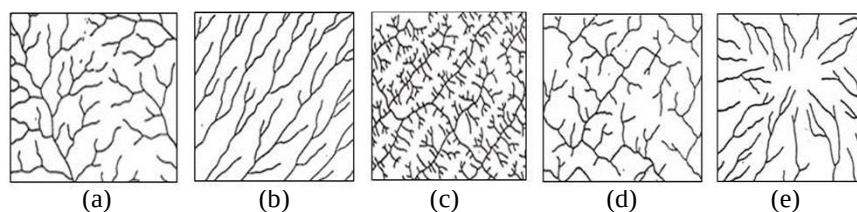


Figura 9. Padrões de rede de drenagem. (a) dendrítico, (b) paralelo, (c) treliça, (d) rectangular, (e) centrípeto
Fonte: Ritter (2012).

Ordem dos cursos de água

A ordenação dos cursos de água dentro de uma bacia hidrográfica permite ter uma ideia do grau de ramificação da mesma. Existem várias classificações para a ordenação dos vários cursos de água que compõem uma bacia hidrográfica, a classificação hierárquica de Strahler (1964) é uma das mais aplicadas e a que será utilizada neste trabalho. Segundo esta classificação aos cursos de água mais pequenos que se consigam identificar atribui-se a ordem 1, a junção de dois cursos de água de 1ª ordem dá origem a um de 2ª ordem. Generalizando: a junção de dois cursos de água de determinada ordem origina um curso de água de ordem seguinte e assim sucessivamente (Figura 10). De notar que quando ocorre a junção de cursos de água de ordens diferentes, ao curso de água a jusante desse ponto é atribuída a mesma ordem do curso de água com maior ordem que lhe deu origem.

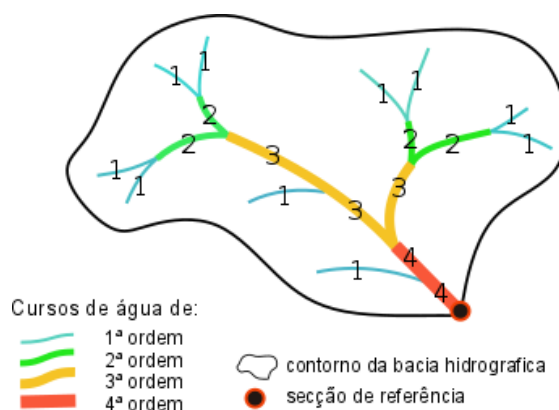


Figura 10. Classificação da rede hidrográfica de uma bacia hidrográfica segundo Strahler (1964).
Esquema adaptado de Kilom691 (2011).

Da ordenação dos cursos de água pode obter-se a magnitude de Shreve (1966), característica da bacia hidrográfica. Resulta do somatório de todos os cursos de água de ordem 1 dessa bacia (Guimarães, 2012; Lencastre e Franco, 2006).

Densidade de drenagem

A densidade de drenagem (D) permite avaliar a eficiência da drenagem de uma bacia hidrográfica. Lencastre (2006) aponta como intervalo de valores para a densidade hídrica, valores entre 0,5 km/km², para bacias mal drenadas, e 3,5 km/km² ou mais, para bacias muito bem drenadas. Por outro lado, a maior densidade hídrica de uma bacia indica menor tendência para ocorrência de cheias relativamente a bacias com menor densidade hídrica (Lencastre e Franco, 2006).

A densidade de drenagem (D_d) relaciona o comprimento total dos cursos de água (C_t) com a área da bacia (A) – expressão (6) (Lencastre e Franco, 2006).

$$D_d = \frac{C_t}{A} \quad (6)$$

4.4 O hidrograma de cheia

O escoamento nos cursos de água varia, habitualmente, ao longo do ano. A variação das propriedades que caracterizam esse escoamento, por exemplo o caudal e a velocidade da água, podem ser representadas através de um gráfico designado por hidrograma (Mendonça *et al.*, 2000).

O hidrograma de cheia (Figura 11) traduz a variação do caudal, numa secção de um curso de água, articulada com a duração e intensidade da pluviosidade na bacia hidrográfica correspondente, durante uma cheia. A Figura 11 exemplifica ainda as diferentes componentes do escoamento superficial. Em períodos de chuvadas intensas o escoamento directo constituirá a maior parte do escoamento superficial. O fluxo de água resultante do escoamento intermédio chega com algum atraso face ao escoamento directo terminando depois deste. Depois das chuvas todas as componentes tendem a desaparecer com excepção

do escoamento de base que, em cursos de água perenes⁹, poderá representar a única entrada de água.

Através do hidrograma de cheia é possível conhecer o tempo de resposta da bacia, ou *lag time*: o tempo que decorre entre o máximo de precipitação na bacia hidrográfica e o máximo de caudal, ou ponta de cheia, na secção de referência (Lencastre e Franco, 2006).

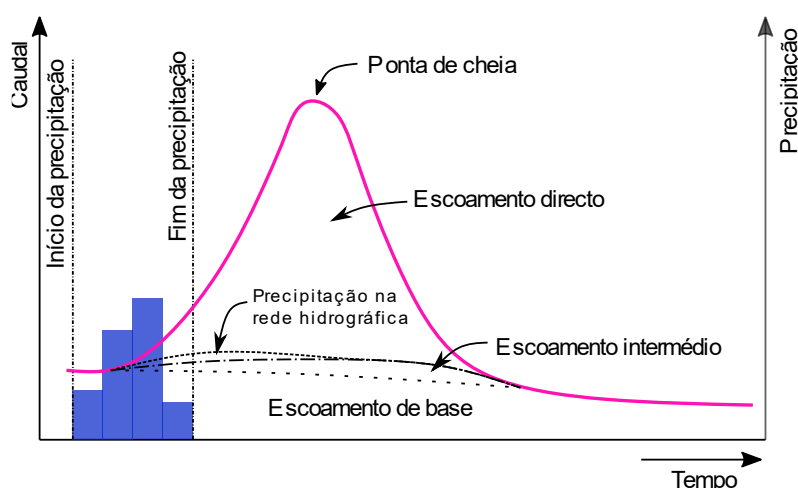


Figura 11. Componentes de um hidrograma de cheia.
Adaptado de Lencastre e Franco (2006).

O hidrograma, geralmente em forma de sino assimétrico, varia em achatamento e na posição relativa do pico de cheia conforme as características topográficas, geográficas e biofísicas da bacia hidrográfica, e conforme as características da precipitação que sobre ela ocorre. A Tabela 2 lista alguns dos factores condicionantes da forma do hidrograma e da ocorrência e severidade de eventuais cheias (Lencastre e Franco, 2006).

4.5 Características das cheias

Do ponto de vista hidrológico, Chow (1956) define cheia como um evento tridimensional, tem magnitude, duração e frequência; sendo binário, isto é, influenciado por factores climáticos e fisiográficos. A caracterização e classificação das cheias, tal como definidos por Chow (1956) e Ramos (2005), pode ser efectuada segundo alguns atributos, a saber: a) número de pontas de cheia, b) periodicidade ou frequência de ocorrência, c) velocidade de

⁹ Cursos de água *perenes*: apresentam sempre escoamento. Contrastam com os cursos de água *intermitentes*, com escoamento apenas durante a estação húmida, e com os cursos de água *efémeros* que existem apenas durante ou logo após o período de ocorrência de precipitação (Lencastre e Franco, 2006).

progressão, d) tempo de duração, e) potência ou magnitude, f) recorrência ou período de retorno e probabilidade de ocorrência, g) caudal, h) tempo de concentração.

Tabela 2. Factores que condicionam a resposta da bacia hidrográfica (Lencastre e Franco, 2006).

Natureza dos factores	Factores que condicionam a resposta da bacia hidrográfica	
Topográficos	• geometria da bacia: forma, área, relevo; • densidade da rede hidrográfica; • profundidade e capacidade de armazenamento dos cursos de água.	
Meteorológicos	Precipitação:	• distribuição; • intensidade; • duração.
Geológicos	• Os que determinam os escoamentos intermédios e subterrâneos; • Tipo de solo.	
Biofísicos	• Densidade de vegetação.	
Antrópicos	• Acção humana sobre factores de outra natureza. Ex: sobre a rede hidrográfica, solos, vegetação.	

a) Número de pontas de cheia

Durante a ocorrência de uma cheia o caudal do curso de água pode atingir um ou vários valores máximos, designados por pontas de cheia. No primeiro caso estamos perante cheias *simples* e no segundo cheias *complexas*.

b) Periodicidade ou frequência de ocorrência

Permite definir áreas e época do ano em que as cheias têm maior probabilidade de ocorrência.

c) Velocidade de progressão

As cheias podem ser *rápidas* ou *progressivas* (ou *lentas*), consoante a velocidade de propagação da onda de cheia, sendo as primeiras as mais perigosas por limitarem, ou até impossibilitarem, a preparação das populações para os seus efeitos.

d) Tempo de duração

As cheias podem durar entre algumas horas a meses. A distribuição da magnitude da cheia pela sua duração constitui o hidrograma de cheia abordado no ponto 4.5.

e) Potência ou magnitude

Refere-se aos caudais de ponta atingidos durante a cheia. Pode ser medida por:

- altura da água,
- volume total,
- caudal (volume/tempo), habitualmente *cumecs* (m³/s).

f) Recorrência ou período de retorno e probabilidade de ocorrência

A recorrência ou *período de retorno* define a ocorrência das cheias em função da sua magnitude. Permite encontrar a probabilidade de ocorrência de determinados caudais de ponta de cheia. O período de retorno, ou intervalo de recorrência, corresponde ao intervalo médio de tempo em que uma cheia de uma determinada magnitude será igualada ou excedida. Uma cheia de elevada magnitude terá uma baixa frequência de recorrência e período de retorno elevado. Pelo contrário, uma cheia de baixa magnitude ocorrerá com maior frequência tendo um pequeno período de retorno. A relação entre o período de retorno (T) de determinada cheia e a sua probabilidade de ocorrência (P) é dada pela expressão (7).

$$T = \frac{1}{P} \quad (7)$$

Na Tabela 3 expõem-se alguns períodos de retorno e respectivas probabilidades de ocorrências.

A tipificação das cheias segundo as suas características é apresentada na Tabela 4 (Ramos, 2013a).

Para o estudo das cheias e inundações é também conveniente clarificar dois conceitos:

a) Caudal

O caudal de um curso de água expressa o volume de água que flui através de uma determinada secção desse curso de água por unidade de tempo. O caudal é habitualmente expresso em m^3/s .

b) Tempo de concentração

No estudo das cheias é importante conhecer o tempo de concentração da água: o tempo necessário para que uma gota de água que caia no ponto mais distante da bacia chegue ao local de estudo. Esta característica da bacia hidrográfica depende de vários factores, entre os quais a forma da bacia, o declive médio, a cobertura vegetal, condições do solo, rugosidade do canal de escoamento e comprimento do curso de água até à zona de estudo.

Tabela 3. Exemplos de pares de períodos de retorno e probabilidades de ocorrência.

Período de Retorno (anos)	Probabilidade de ocorrência (%)
T2	50
T10	10
T20	5
T50	2
T100	1
T1000	0,1

4.6 *Tipos de inundações, factores desencadeantes e agravantes*

Ramos (2013a) considera a existência de quatro tipos de inundações: inundações fluviais ou cheias, inundações em depressões topográficas, inundações costeiras e inundações urbanas. A Tabela 5 relaciona os tipos de inundações com as suas causas. Ramos (2013b) divide as inundações fluviais segundo o seu factor desencadeante de acordo com a

Tabela 6.

No estudo das cheias e inundações, para além do conhecimento das causas destes fenómenos, é importante distinguir os factores que potenciam os seus efeitos. Ramos (2005) inúmera os

factores agravantes das cheias a dois níveis, ao nível da bacia hidrográfica e ao nível dos fundos dos vales e divide-os em dois grupos, factores de origem natural e antrópica (Tabela 7).

Tabela 4. Classificação das cheias segundo as suas características (Ramos, 2013a).

CrITÉRIOS	Tipo de cheia
N.º de pontas de cheia	• simples; • complexa.
Periodicidade ou frequência de ocorrência	• regular ou irregular; • n.º de cheias/ano; • época do ano (cheias outonais, invernais).
Velocidade de progressão	• rápida ou repentina (<i>flash floods</i>); • lenta ou progressiva (<i>slow floods</i>).
Duração	• rápida ou repentina (< 1 dia) (<i>flash floods</i>); • semi-rápida (≥ 1 dia e ≤ 1 semana) (<i>rapid-onset floods</i>); • lenta ou progressiva (> 1 semana) (<i>slow-onset floods</i>).
Magnitude / Área inundada	• pequena; • média; • grande.
Recorrência ou período de retorno (probabilidade de ocorrência)	• anual; • decenal; • centenária; • milenária.

Tabela 5. Tipos e causas de inundações (Ramos, 2013a).

Tipo	Causa
Inundação fluvial ou cheia	• chuvas abundantes e/ou intensas; • fusão de neve ou do gelo; • efeito combinado chuva e efeito das marés e/ou <i>storm surge</i>¹⁰; • obstáculos ao escoamento fluvial ou derrocada dos obstáculos;
Inundação de depressões topográficas	• subida do lençol freático; • retenção da água da precipitação por um solo ou substrato; • cheias.
Inundação costeira	• <i>storm surge</i>; • tsunami ou maremoto; • subida eustática¹¹ do nível do mar; • sismos com fenómenos de subsidência tectónica.
Inundação urbana	• chuva intensa e sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais; • subida do nível freático; • cheias.

Tabela 6. Tipos inundações fluviais, ou cheias, segundo o seu factor desencadeante (Ramos, 2013b).

Tipo de cheia	Causa	Factor desencadeante
Cheia pluvial lenta	Meteorológica	Chuvas prolongadas
Cheia pluvial rápida	Meteorológica	Chuva intensa
Cheia de fusão da neve	Meteorológica	Subida da temperatura na Primavera
Cheia de fusão de efeito combinado	Meteorológica	Subida da temperatura e chuva intensa
Cheia de fusão do gelo	Geológica	Erupções vulcânicas
Cheia costeira	Meteorológica e marinha	Escoamento fluvial elevado, efeito das marés e <i>storm surge</i>
Cheia de obstáculo	Geológica e geomorfológica	Movimentos de vertente de obstrução ao escoamento fluvial
Cheia de derrocada natural	Hidrogeomorfológica	Cedência de obstáculo natural
Cheia de derrocada artificial	Antrópica	Rotura de barragem ou dique

Tabela 7. Factores agravantes das cheias (Ramos, 2005, 2013a).

<i>Natureza dos factores</i>	<i>Naturais (fisiográficos)</i>	<i>Antrópicos</i>
Factores agravantes das cheias	<i>Ao nível da bacia hidrográfica:</i> • substrato geológico de permeabilidade reduzida; • relevo (declive, desnível, ...); • rede hidrográfica: densidade, hierarquização, sinuosidade; • coberto vegetal: tipo e cobertura. <i>Ao nível dos fundos de vale:</i> • estreitamentos naturais dos vales; • características do leito de cheia (largura e inclinação); • obstáculos transportados pelas cheias.	<i>Ao nível da bacia hidrográfica:</i> • destruição do coberto vegetal nas áreas declivosas; • práticas agrícolas inadequadas; • impermeabilização dos solos. <i>Ao nível dos fundos de vale:</i> • gestão inadequada das barragens; • assoreamento dos canais fluviais; • estrangulamento dos canais fluviais; • obstáculos perpendiculares ao sentido de escoamento; • ocupação indevida dos leitos de cheia; • falta de limpeza dos canais fluviais; • vazamento indevido de lixo e entulhos; • encanamento dos cursos de água; • sistemas de águas pluviais e residuais inadequados.

4.7 Inundações em Portugal

As inundações são o tipo de catástrofe mais frequente em Portugal. Os dados disponibilizados por Guha-Sapir *et al.* (2017) atribuem às inundações 37,8% do total de desastres naturais em Portugal (Figura 4).

As cheias repentinas de 1967, na área da grande Lisboa, foram as mais mortíferas fazendo pelo menos 462 mortos e constituíram o maior desastre natural do século XX em território nacional. 1979 foi o ano em que mais gente foi afectada por cheias em Portugal. Mais de 45 000 pessoas da ilha da Madeira, do Norte e do Centro de Portugal Continental foram atingidas pelas cheias, tendo ocorrido 23 vítimas mortais. Mais recentemente, em 2010, a ilha da Madeira voltou a ser afectada por cheias. O evento resultou em 43 vítimas mortais, tendo 2010 sido o ano com maior número de mortes devido a cheias e inundações desde 1967 (Guha-Sapir *et al.*, 2017; Quaresma, 2008; Raposo, 2014; RTP, 2007; SNIRH e ANPC, 2017; Zêzere *et al.*, 2014).

No território português ocorrem inundações provocadas por cheias, por subida do lençol freático e por sobrecarga dos sistemas artificiais de drenagem dos aglomerados urbanos. Embora em menor número, podem ainda ser o resultado de galgamentos costeiros ou de *tsunamis*. No entanto, em Portugal, a precipitação é a principal causa de inundações não relacionadas com o mar (Julião *et al.*, 2009; Ramos, 2013a).

As inundações que não têm origem marítima, são consequência de duas formas distintas de precipitação: (1) precipitação significativa ao longo de dias ou semanas que pode originar cheias progressivas, consequência da saturação dos solos e subida dos lençóis freáticos. Ramos e Reis (2001) relacionam estes “*longos períodos chuvosos com a permanência da circulação zonal de oeste durante a qual a Península Ibérica é varrida por chuvas frontais, provocadas pela passagem sucessiva de depressões sub-polares e sistemas frontais a elas associados*”; (2) eventos extremos de precipitação durante períodos de tempo relativamente curtos, horas ou minutos, que podem originar cheias rápidas e sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais dos aglomerados urbanos. Este tipo de precipitação, forte e concentrada no tempo, está relacionada com depressões convectivas (Julião *et al.*, 2009; Ramos, 2013a; Ramos e Reis, 2001).

Na Figura 12 esquematizam-se as principais causas de inundações, não relacionadas com o mar, que ocorrem em Portugal.

As cheias progressivas estão geralmente associadas às grandes bacias hidrográficas, como a do rio Tejo ou do rio Guadiana ocorrendo inundação de grandes áreas do território. Pela sua característica de formação progressiva permitem a preparação antecipada das populações para os seus efeitos não constituindo grande perigo (Ramos e Reis, 2001).

Por outro lado, as cheias rápidas representam um perigo para as populações ribeirinhas devido ao seu carácter súbito, tendo maior incidência nas bacias hidrográficas de pequena e média dimensões (Ramos, 2013a). As cheias de 20 de Fevereiro de 2010, na ilha da Madeira, Figura 13a) e b), são exemplo do potencial destruidor deste tipo de cheias. Após algumas horas de precipitação extremamente intensa, que no Funchal ultrapassou um sexto da precipitação anual, foram registadas mais de 40 mortes, mais de 600 pessoas foram afectadas e foram contabilizados mais de 1000 milhões de EUR em prejuízos (Abreu, 2010; A.P.P., 2010; TSF, 2013). As cheias em Albufeira do dia 1 de Novembro de 2015 são outro exemplo

do poder destrutivo das cheias rápidas, Figura 13c) e d). O temporal que se fez sentir na região do Algarve provocou em Albufeira inundações que ultrapassaram os 14 milhões de EUR, incluindo mais de 800 habitações danificadas, tendo várias pessoas ficado desalojadas, e pelo menos 310 sinistros em estabelecimentos comerciais e industriais (CVARG/CIVISA, 2015; LUSA, 2015).

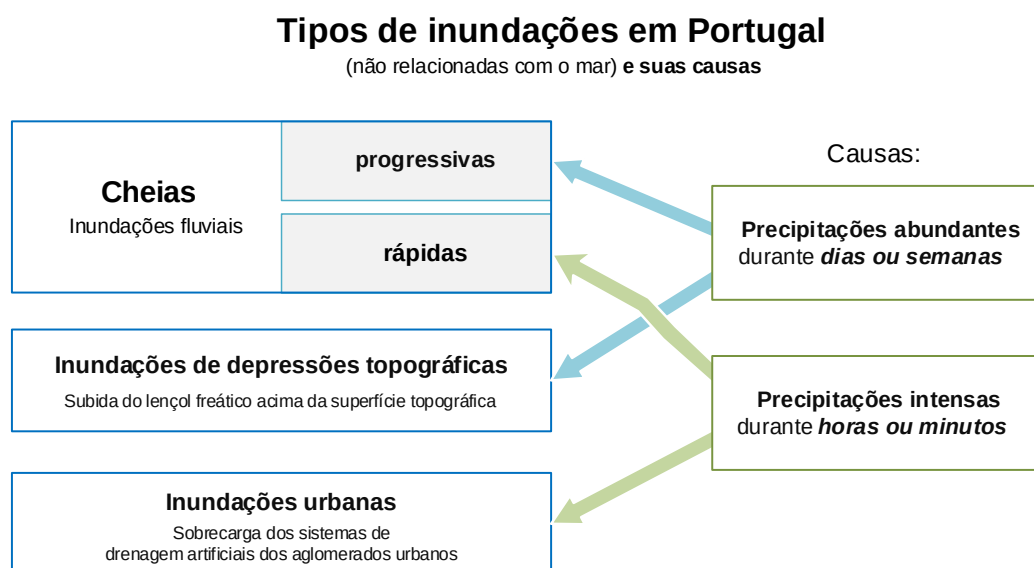


Figura 12. Inundações em Portugal (não relacionadas com o mar) e suas causas.
Adaptado de Ramos (2013a).

5. Estimativa do risco de inundação

Tal como para a estimativa do risco em geral, também para estimar o risco de inundação existem várias metodologias. Podem ser utilizadas metodologias de análise multicritério, entre as quais se destaca a metodologia AHP (Análise Hierárquica de Processos) por ser a menos subjectiva combinando a experiência do operador com a lógica matemática. São também utilizadas metodologias de modelação hidráulica que utilizam *software* para modelação do perímetro de inundação e de velocidade de corrente (Gonçalves, P., 2012).



Figura 13. Cheias na Ilha da Madeira em 2010: a) Funchal: Transbordo ribeira João Gomes¹². b) Serra de Água após o temporal¹³. Cheias em Albufeira em 2015: c) Asfalto destruído¹⁴. d) Nível da água no posto da GNR¹⁵.

Apresenta-se a descrição da metodologia utilizada por APA (2016) nos PGRI. Trata-se de uma metodologia que integra métodos quantitativos, baseados em modelação hidráulica, e métodos qualitativos na estimativa do risco de inundação. Nesta metodologia o risco é função da *perigosidade hidrodinâmica* (P_i) e da *consequência socioeconómica* (C) de acordo com a expressão (8):

$$R = f (P_i , C) \quad (8)$$

¹² Fonte: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/8526587.stm>. Autor: Michal Bach.

¹³ Fonte: <http://aoencontrodasaguas.blogspot.pt/2010/04/serra-de-agua.html>. Autor: Sérgio Aguiar.

¹⁴ Fonte: https://ionline.sapo.pt/artigo/420297/cheias-lojistas-de-albufeira-ainda-nao-receberam-pelos-estragos-de-2008-?seccao=Portugal_i. Autor: Luís Forra / Lusa.

¹⁵ Fonte: <http://happy-team.org/showthread.php/118777-As-imagens-das-inundações-no-Algarve>. Autor desconhecido.

Ambos os parâmetros de que depende o risco de inundação são classificados em cinco classes e depois reunidos sob a forma de uma matriz de risco. O risco de inundação estima-se, habitualmente, para várias probabilidades de ocorrência a que estão associadas diferentes magnitudes. O Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de Outubro, por exemplo, indica a necessidade de estimar de risco para cenários de probabilidade de ocorrência (1) baixa, i.e. inundações de magnitude extrema que têm associados períodos de retorno de centenas de anos; (2) média, i.e., inundações de média magnitude com período de retorno igual ou superior a 100 anos, e (3) alta, i.e., inundações de baixa magnitude com período de retorno inferior a 100 anos (ANPC, 2016).

5.1 *Modelação hidráulica de cheias, software HEC-RAS*

De entre os softwares de modelação hidráulica, o HEC-RAS¹⁶ é utilizado pela *Federal Emergency Management Agency* e amplamente utilizado pela comunidade científica. Esta ferramenta, que é um dos produtos desenvolvidos pelo *Hydrologic Engineering Center* pertencente ao *U.S. Army Corps of Engineers*, permite a modelação de inundação em fluxo constante 1D (unidimensional), fluxo turbulento 1D e 2D (uni- e bidimensional), modelação de transporte de sedimentos e modelação de temperatura e qualidade de água. As modelações têm por base as equações Saint-Venant e a Equação de Manning-Strickler (lei da resistência) (Fernandez *et al.*, 2013; HEC, 2016).

A modelação hidráulica envolve, habitualmente, 3 fases: (1) Pré-processamento – Aquisição do MDT (Modelo Digital do Terreno), características geométricas e hidráulicas do canal e caudais. (2) Processamento e calibração do modelo – é gerado um resultado preliminar que é comparado com o histórico de inundações. O modelo pode ser ajustado através da alteração dos coeficientes de rugosidade de Manning (medida da acção da rugosidade na velocidade da água) e de novo processamento. (3) Representação da informação produzida – são produzidas cartas de perímetro de inundação, cartas de altura da coluna de água e cartas de velocidade da corrente. A Figura 14 mostra de forma esquemática as diversas fases de uma modelação hidráulica típica (Gonçalves, P., 2012).

¹⁶ Hydrologic Engineering Center's (CEIWR-HEC) River Analysis System (HEC-RAS).
<http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>

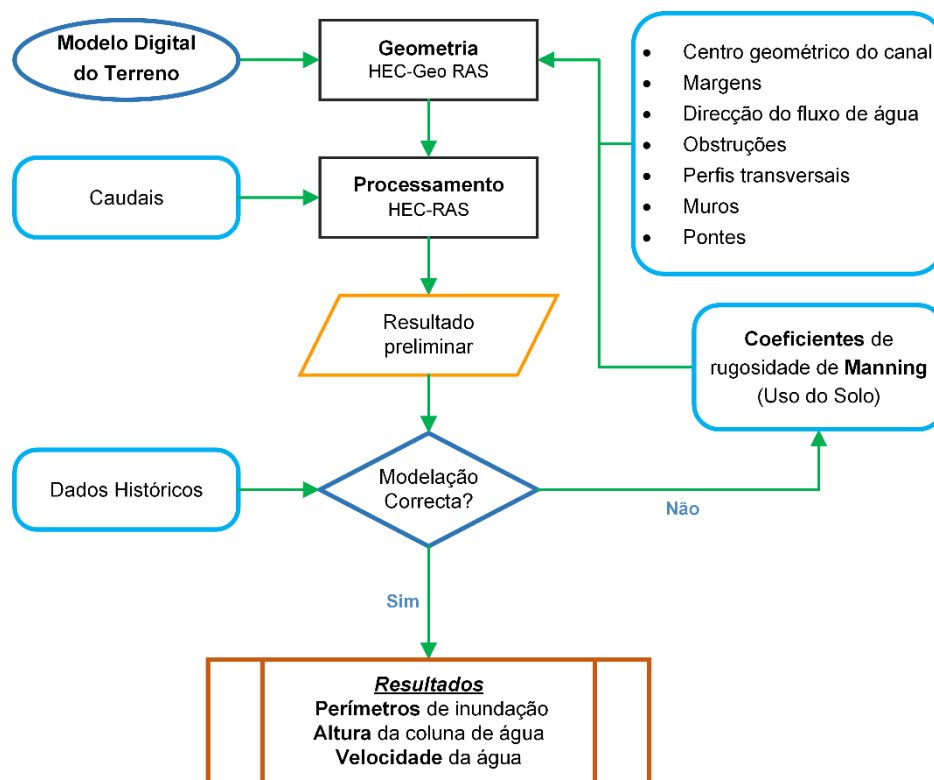


Figura 14. Esquema metodológico utilizado em modelação hidráulica de inundações. Adaptado de Gonçalves (2012).

5.2 Perigosidade hidrodinâmica

A perigosidade hidrodinâmica indica o perigo que representa a ocorrência de um evento de inundação, com determinada magnitude, associada a um determinado período de retorno. Depende da profundidade e da velocidade da água para cada local. A fórmula usada para o cálculo da perigosidade hidrodinâmica consta na expressão (9) sendo que d corresponde à profundidade (m) e v à velocidade do escoamento (m/s) da água para cada local.

$$P_i = d (v + 0,5) \quad (9)$$

Na Tabela 8 apresenta-se a classificação da perigosidade hidrodinâmica em cinco classes. O cálculo da perigosidade poderá ser feito através de álgebra de mapas em ambiente SIG tendo por base os mapas de profundidade e de velocidade obtidas na modelação hidráulica das cheias de onde resultará uma carta de perigosidade.

Tabela 8. Perigosidade hidrodinâmica da inundação (APA, 2016).

$P_i = d (v + 0,5)$	Perigosidade	Descrição do risco (considerando apenas a população)
$< 0,75$	Inexistente	–
$0,75 - 1,25$	Baixa	Cautela
$1,25 - 2,50$	Média	Perigo para alguns
$2,50 - 7$	Alta	Perigo para a maior parte das pessoas
> 7	Muito alta	Perigo para toda a população

P_i – perigosidade para um período de retorno i ; d – profundidade (m); v – velocidade da corrente (m/s).

5.3 Consequência sócio-económica

O parâmetro *consequência socioeconómica* expressa os potenciais danos para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as actividades económicas devidos aos eventos de inundação. Através da classificação, feita por APA (2016), para as consequências socioeconómicas que se encontra resumida na Tabela 9, e utilizando as fontes de informação georreferenciada apropriadas (*e.g.* carta de ocupação de solos, censos, ANPC, APA e outras), será possível produzir uma *carta de consequências*.

5.4 Matriz de risco e carta de risco de inundação

O risco, equações (8) e (9), é definido pela matriz de risco apresentada na Figura 15. Em ambiente SIG é possível combinar as cartas de perigosidade e de consequência produzidas em função da matriz de risco e obter uma carta de risco.

Tabela 9. Consequências socioeconómicas (APA, 2016).

Consequência	Critério
Máxima	Tecido urbano.
Alta	Serviços de emergência, administração do estado, educação, saúde, segurança e justiça , aeroportos, parques de campismos, infraestruturas de produção de energia, infraestruturas, abastecimento de águas para consumo, infraestruturas de tratamento de resíduos e águas residuais, equipamentos culturais e zonas históricas (património mundial, de interesse nacional ou de interesse, público), zonas comerciais e indústrias abrangidas pelas Directivas Seveso e IPPC.
Média	Zonas industriais (restantes), instalações agrícolas, rede ferroviária, rede viária , terminais, portuários, aeródromos, zonas históricas (municipais) e sítios arqueológicos, estufas e viveiros, lixeiras, sucatas e aterros restantes equipamentos públicos e privados.
Reduzida	Estaleiros navais e docas secas, marinas e docas pesca , minas a céu aberto, campos de golfe e outras instalações desportivas e de lazer , culturas temporárias de regadio, aquicultura litoral e interior, áreas em construção e áreas abandonadas em territórios artificializados.
Mínima	Estacionamento e logradouros, pedreiras, parques e jardins , cemitérios, restantes áreas agrícolas, áreas florestais, zonas protegidas ou massas de água designadas ao abrigo das directivas Aves e Habitats, Águas Balneares e Perímetros de Protecção às águas para consumo humano; águas marinhas e costeiras, águas-interiores.

Na Figura 16 mostra-se a metodologia utilizada em SIG para produzir a carta de risco a partir das componentes do risco. A carta de profundidade e a carta de velocidade, produzidas através de modelação hidráulica, são utilizadas para produzir uma carta de perigosidade de através da expressão que é reclassificada segundo a Tabela 8. A COS (Carta de Uso e Ocupação do Solo) e a carta de elementos socioeconomicamente sensíveis combinam-se, de acordo com a Tabela 9 para produzir uma carta de consequências. A carta do risco é, finalmente, produzida através da combinação da carta de perigosidade e da carta de consequência segundo a matriz de risco da Figura 15. Neste trabalho, que pretende ser uma análise preliminar ao risco de inundação, ir-se-á apresentar uma carta de perigosidade para um troço do Nabão dentro da cidade de Tomar.

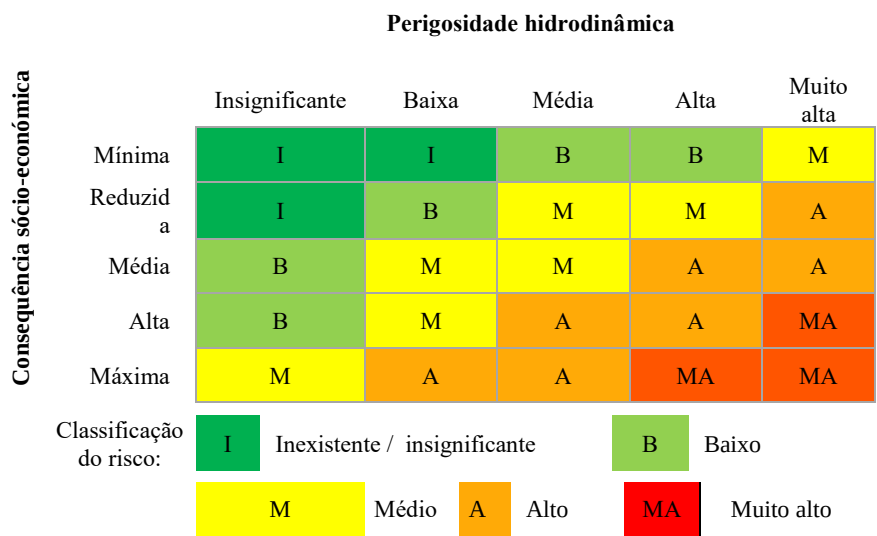


Figura 15. Matriz de risco de inundação (APA, 2016).

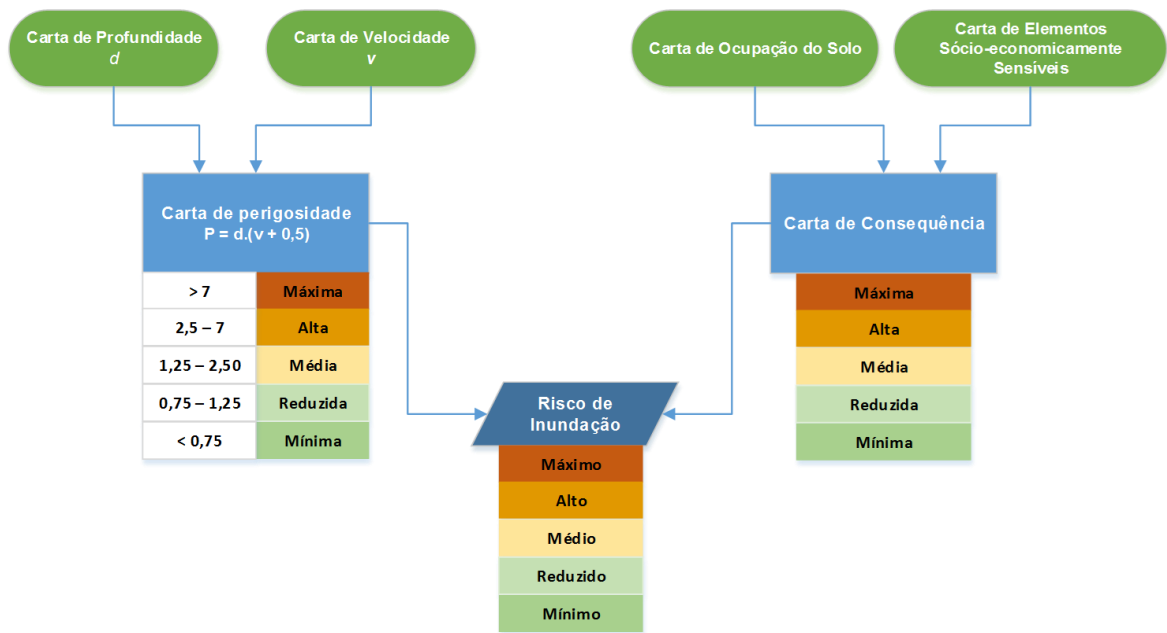


Figura 16. Metodologia SIG para a determinação do risco de inundação. Adaptado de APA (2016).

III. Caracterização do território da bacia hidrográfica do rio Nabão

1. Introdução

Neste capítulo pretende-se fazer uma caracterização geral do território no qual a BH do rio Nabão está inserida. Neste sentido, ir-se-á apresentar o enquadramento geográfico, uma caracterização genérica biofísica, demográfica, bem do histórico de cheias no rio Nabão.

2. Metodologia SIG e fontes de informação

O processamento e análise da informação geográfica realizado neste capítulo foi feito em *software* SIG de diferentes origens. A gestão, o processamento e análise da informação geográfica foram realizados através da plataforma ArcGIS¹ Desktop 10.4 e em QGIS² 2.18. A cartografia foi produzida exclusivamente em QGIS 2.18. A definição da rede de drenagem e delimitação da bacia hidrográfica foi feita através do conjunto de ferramentas TauDEM³ 5.3.7. Estas ferramentas foram utilizadas através de extensões da aplicação ArcMap, parte integrante da plataforma ArcGIS. Para além de *software* SIG, foi também utilizado o programa de folha de cálculo MS Excel, da *suite* Microsoft Office 2016, para processamento de dados derivados de informação geográfica e para produção de gráficos.

A utilização de SIG implica a manipulação de informação georreferenciada que pode provir de diferentes origens e ter diferentes características técnicas. Para uma optimização da integração dos diferentes dados, é essencial a referenciação dos mesmos em sistemas de coordenadas apropriados. Apesar de as versões modernas de sistemas, como ArcGIS ou QGIS, permitirem a análise conjunta de fontes de informação geográfica com diferentes

¹Software proprietário desenvolvido pela Esri – Environmental Systems Research Institute, <http://www.esri.com/arcgis>.

² Software de código aberto e de utilização livre (*GNU General Public License*), desenvolvido pela *QGIS Development Team*, sob projecto da OSGeo – *Open Source Geospatial Foundation*. Disponível em <http://qgis.org>.

³ TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models), software de utilização livre (*GNU General Public License*), desenvolvido por David Tarboton, Utah State University, USA. Disponível em <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5>.

referenciais, é boa prática a conversão de todas as fontes de informação para o mesmo referencial (Esri, 2017; Gruver, 2017).

O sistema de coordenadas ETRS89 Portugal TM06 é o sistema recomendado para Portugal pela agência EuroGeographics⁴ (DGTerritório, 2013). Baseia-se no sistema de referência global ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*), com projecção cartográfica Transversa de Mercator, de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 10. Este foi o sistema de coordenadas adoptado neste estudo. Antes de qualquer processamento, todos os dados geográficos utilizados que não se encontravam originalmente sob este standard, tiveram as suas coordenadas transformadas. Para esta transformação foi seguida a metodologia descrita por Gonçalves (2009), conforme instruções de Gonçalves (2008a). Trata-se de uma metodologia que faz uso de grelhas de diferenças de coordenadas entre os Datum locais mais utilizados em Portugal, Datum 73 e Datum Lisboa. Gonçalves (2009) indica que este método é “*muito mais rigoroso que os métodos de Bursa-Wolf ou Molodensky, normalmente implementados nos programas comerciais e outros*”.

Tabela 10. Especificações dos parâmetros da projecção Transversa de Mercator utilizada no sistema ETRS89 / Portugal TM06 (DGTerritório, 2013).

Parâmetro	Especificação
Elipsóide de referência:	GRS80 Semi-eixo maior: $a = 6\,378\,137\text{ m}$ Achatamento: $f = 1 / 298,257\,222\,101$
Projecção cartográfica:	Transversa de Mercator
Latitude da origem das coordenadas rectangulares:	$39^{\circ} 40' 05",73\text{ N}$
Longitude da origem das coordenadas rectangulares:	$08^{\circ} 07' 59",19\text{ W}$
Falsa origem das coordenadas rectangulares:	Em M (distância à Meridiana): 0 m Em P (distância à Perpendicular): 0 m
Coefficiente de redução de escala no meridiano central:	1,0

Para a caracterização do território da BH do Nabão partiu-se da informação geográfica apresentada na Tabela 11, que apresenta também a sua origem e um resumo das suas especificações.

⁴ Associação das autoridades nacionais de cartografia e cadastro europeias, da qual a Direcção-Geral do Território faz parte. <http://www.eurogeographics.org>.

A CAOP (Carta Administrativa Oficial de Portugal), versão 2016⁵, foi utilizada como fonte dos limites administrativos do país. A hipsometria e a análise hidrográfica tiveram por base o MDT disponibilizado pelo Professor José Alberto Gonçalves⁶ da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. A rede de drenagem e o delineamento da bacia hidrográfica foram obtidos por processamento deste modelo com ferramentas do conjunto TauDEM. Trata-se de um MDT gerado a partir de dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) 1 arco-segundo, com resolução⁷ original aproximada de 30 metros disponibilizados por NASA/JPL em Setembro de 2014. O autor utilizou estes dados para montar um mosaico para Portugal que projectou no sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89. A resolução final deste MDT, doravante designado por STRM-JAG⁸, é de 25 metros.

O SNIAmb⁹ (Sistema Nacional de Informação do Ambiente) foi fonte de informação hidrográfica utilizada como complemento à derivada do MDT STRM-JAG e como enquadramento cartográfico (e.g. representação de cursos e massas de água fora da BH do Nabão). Foi a partir desta fonte que se obteve a Carta Litológica, produzida no âmbito do Atlas do Ambiente.

O uso e ocupação do solo teve por base a COS de Portugal Continental para 2010, versão 1.0¹⁰, disponibilizada pela DGTerritório (Direcção-Geral do Território). A informação geográfica sobre a demografia e edificado proveio do INE (Instituto Nacional de Estatística) e é referente aos Censos 2011¹¹.

Para além da informação constante na Tabela 11, utilizou-se toponímica proveniente do Google Maps¹² e imagem aérea disponível no Bing Maps¹³ para realizar enquadramento cartográfico.

⁵ Disponível em:

http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal__cao_p_/cao_em_vigor/

⁶ <http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal>

⁷ Dimensão de cada célula (ou *pixel*, normalmente quadrada) da grelha.

⁸ Disponível em: <http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/srtm>

⁹ <http://sniamb.apambiente.pt>

¹⁰ Disponível em:

http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/cartografia_tematica/cartografia_de_uso_e_ocupacao_do_solo__cos_clc_e_copernicus_/

¹¹ Disponível em: <http://mapas.ine.pt/download/index2011.phtml>

¹² Serviço de visualização interactiva de mapas e imagens de satélite da Google. <https://www.google.pt/maps>.

¹³ Serviço de visualização interactiva de mapas e imagens aéreas da Microsoft. <https://www.bing.com/maps>.

Informação não georreferenciada foi reunida e processada. Nomeadamente, dados obtidos a partir do Portal do Clima¹⁴, um projecto da responsabilidade do IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera), que permitiram a caracterização climática da região do Médio Tejo, zona onde se insere a maioria da BH do Nabão.

Para caracterizar a BH do Nabão em termos da sua hidrologia, foi definida a rede de drenagem e feita a delimitação da bacia com base no processamento do MDT STRM-JAG. Este MDT, com resolução de 30 metros, permite obter cartografia a uma escala equivalente de 1:60 000 (Tobler, 1987). Muito embora o SNIAmb disponibilize informação geográfica da mesma temática com uma escala de 1:25 000, optou-se por realizar o processamento do MDT de modo a explorar a metodologia, tendo também em conta a utilização deste MDT na modelação hidráulica mais tarde neste trabalho.

Na Figura 17 apresenta-se o modelo de análise espacial geral utilizado para o estudo hidrográfico da BH do Nabão, com o objectivo de definir a sua rede de drenagem e os seus limites, respectivamente. O processamento inicia-se com a remoção de possíveis depressões de modo a produzir um MDT sem impedimentos ao cálculo do escoamento. O segundo passo é a determinação da direcção do escoamento seguido da determinação dos valores de escoamento acumulado para cada célula da grelha¹⁵. Este último processo estima, para cada uma delas, o número de células restantes que para ela contribuem com escoamento, valor que sugere o caudal que nela circula.

A identificação das linhas de drenagem é feita através da escolha de um valor limite, a partir do qual o escoamento acumulado numa célula indica a existência de um curso de água. A identificação das células que possuem valor de escoamento acumulado superior ao valor limite, possibilita a definição da grelha da rede de drenagem.

Após a identificação das linhas de drenagem, a rede é hierarquizada através do método de classificação de Strahler ou do método de Shreve e, posteriormente, transformada em informação geográfica vectorial.

¹⁴ <http://portaldoclima.pt>.

¹⁵ Grelha ou *grid*, um dos formatos do modelo matricial (ou *raster*) de dados geográficos que representa a realidade de forma discreta, atribuindo um valor a cada célula de uma matriz. A imagem é o outro formato de dados do modelo matricial (e.g. imagens de satélite).

Tabela 11. Fontes e principais características técnicas da informação geográfica utilizada neste estudo.

Designação da informação geográfica	Formato	Escala equivalente ou Resolução	Ano	Sistema de Referência	Origem
MDT STRM (STRM-JAG)	raster	30 m ¹⁶	2014	PT-TM06/ETRS89	José Alberto Gonçalves - NASA/JPL
Carta Administrativa Oficial de Portugal – CAOP. Versão 2016	vectorial	1: 25 000	2016	PT-TM06/ETRS89	DGTerritório
Principais Bacias Hidrográficas (DQA)	vectorial	1: 25 000	2010	PT-TM06/ETRS89	SNIAmb
Rede hidrográfica GeoCodificada	vectorial	1: 25 000	2006	PT-TM06/ETRS89	SNIAmb
Massas de água superficiais Lagos de Portugal continental	vectorial	1: 25 000	2008	PT-TM06/ETRS89	SNIAmb
Massas de água superficiais de Transição de Portugal continental	vectorial	1: 25 000	2008	PT-TM06/ETRS89	SNIAmb
Rede de estações hidrométricas ativas (ligação direta ao SNIRH)	vectorial	1: 10 000	2015	PT-TM06/ETRS89	SNIAmb provenientes do SNIRH
Rede de estações meteorológicas (ligação direta ao SNIRH)	vectorial	1: 10 000	2015	PT-TM06/ETRS89	SNIAmb provenientes do SNIRH
Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal continental para 2010 (COS2010)	vectorial	UMC: 1 ha. DML: 20 m LMP: 20 m ET ≥ 85% EP ≥ 5,5 m	2010	PT-TM06/ETRS89	DGTerritório
Atlas do Ambiente - Carta Litológica	vectorial	1: 1 000 000	1982	Datum Lisboa/ Hayford-Gauss IGeoE	SNIAmb – Atlas do Ambiente
Base Geográfica de Referenciação da Informação 2011	vectorial	1: 10 000	2011	PT-TM06/ETRS89	INE – Instituto Nacional de Estatística. Censos 2011

UMC – Unidade cartográfica mínima; DML – Distância mínima entre linhas; LMP – Largura mínima entre polígonos;
ET – Exactidão temática; EP – Exactidão posicional.

Para delinear a bacia hidrográfica que contribui para uma determinada secção de referência, submetem-se a processamento as grelhas de direcção de escoamento e de escoamento

¹⁶ Embora a grelha STRM-JAG tenha resolução de 25 m, foi produzida a partir de dados com resolução original de 30 m.

acumulado e a localização da secção em causa. A bacia hidrográfica obtida nesta grelha é, finalmente, convertida em formato vectorial.

As diversas implementações do modelo apresentado na Figura 17 envolvem habitualmente mais etapas, podendo variar nas fontes de informação para a determinação das bacias.

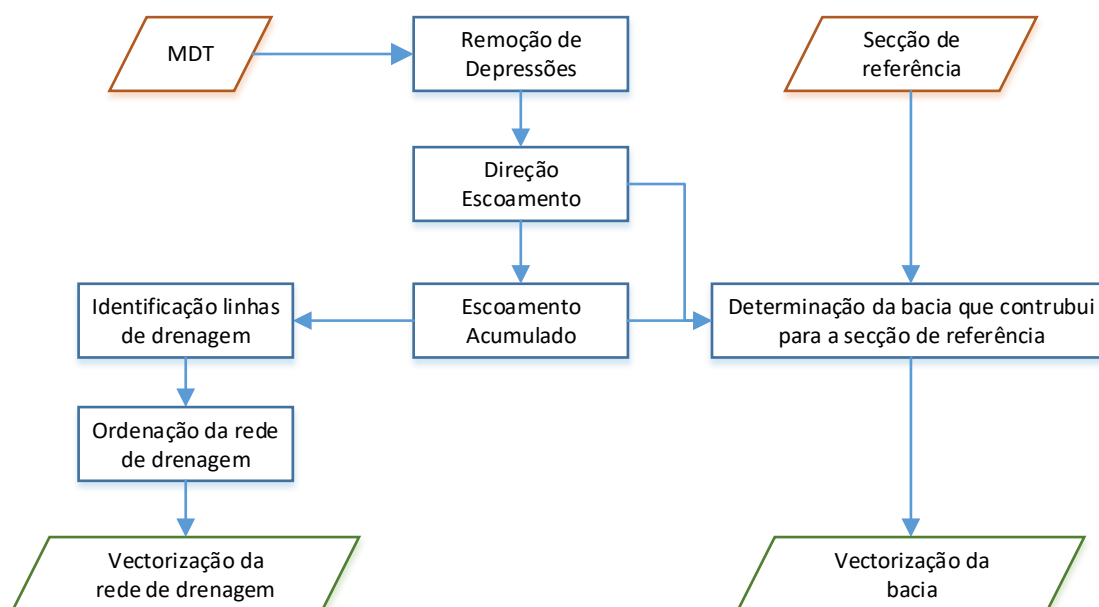


Figura 17. Modelo de análise espacial geral para definição da rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica. Elaboração própria a partir de Jenson e Domingue (1988) e Tarboton (2003, 2011).

A metodologia de análise hidrológica seguida neste trabalho foi descrita por Tarboton (2011) e encontra-se no Anexo A dividida em dois modelos: Modelo A – dado um MDT produz um novo MDT com depressões corrigidas, grelhas de direcção do escoamento, escoamento acumulado e declividade; e uma rede de drenagem preliminar que servirá para definir a localização da secção de referência de interesse; Modelo B – aceita como informação de entrada a secção de referência, o MDT corrigido e as grelhas de direcção do escoamento e de escoamento acumulado para produzir, grelhas da rede de drenagem, rede de drenagem ordenada e bacia hidrográfica, para além da rede de drenagem e bacia hidrográfica vectorizadas. Finalmente, é calculada e adicionada à tabela da bacia hidrográfica vectorizada o seu perímetro e área, bem como informação sobre que secção de referência lhe deu origem.

Os dois modelos de análise espacial serviram para determinar a rede de drenagem e a BH do rio Nabão. No entanto, foram também analisadas as bacias dos seus principais afluentes. Para isso desenvolveu-se o Modelo C, Anexo A, que permite, de forma automatizada,

percorrer um ficheiro com informação sobre a localização das várias secções de referência, processar cada uma através do Modelo B e guardar os resultados em directórios individuais.

Na Tabela 12 são descritas as funções das ferramentas TauDEM aplicadas no modelo de análise hidrológica utilizado.

Tabela 12. Função dos algoritmos TauDEM utilizados na definição da rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica (Tarboton, 2003, 2011).

Algoritmo TauDEM	Função
<i>Pit remove</i>	Remoção de depressões.
<i>D8 Flow Directions</i>	Criação da grelha de direcção de escoamento segundo o algoritmo D8 ¹⁷ .
<i>D8 Contributing Area</i>	Criação da grelha de escoamento acumulado segundo o algoritmo D8.
<i>Stream Definition by Threshold</i>	Identificação das linhas de drenagem por valor limite de escoamento acumulado. Utilizado neste modelo para produzir uma rede de drenagem temporária.
<i>Move Outlets to Streams</i>	Ajustar a localização das secções de referência que possam estar desalinhadas com a rede drenagem, de modo a que se sobreponham a esta.
<i>Peuker Douglas Stream Definiton</i>	Combina o algoritmo de suavização de linhas de drenagem <i>Peuker Douglas</i> com <i>D8 Contributing Area</i> , e <i>Stream Definition by Threshold</i> . Identificação das linhas de drenagem por valor limite de escoamento acumulado partir do resultado da grelha de direcção de escoamento. Suavização das redes de drenagem. Opcionalmente produz outros resultados que não são utilizados neste trabalho.
<i>Stream Reach and Watershed</i>	Ordenação e vectorização da rede de drenagem, determinação da sub-bacia para uma secção de referência. Produz outros resultados que não são utilizados neste trabalho.
<i>Watershed Grid to Shapefle</i>	Vectorização da bacia da secção de referência

Por comparação da BH do Nabão obtida a partir do MDT STRM-JAG com dados disponíveis no SNIAmb, nomeadamente com o tema *Principais Bacias Hidrográficas*¹⁸, produzido no âmbito da DQA (Directiva Quadro da Água), verifica-se que esta última fonte considera que uma área de 54 km², correspondentes a um conjunto de sub-bacias endorreicas localizadas no extremo sudoeste da BH do Nabão definida computacionalmente, não

¹⁷ Modelo de escoamento descrito por O'Callaghan e Mark (1984), Garbrecht e Martz (1997) e Jenson e Domingue (1988).

¹⁸ <http://sniamb.apambiente.pt/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7B6DF7CDD7-68AB-45E7-99A5-E3B7C5EFC809%7D>

pertencem a esta bacia. Estas bacias endorreicas são atribuídas à bacia endorreica do Maciço Calcário. Assim, optou-se por compatibilizar os resultados obtidos com a informação disponível no SNIAmb, tendo sido eliminadas do resultado do processamento do MDT as áreas correspondentes às bacias endorreicas.

A rede hidrográfica obtida, quer através da ferramenta *Stream Definition By Threshold*, quer através da ferramenta *Peuker Douglas Stream Definiton* depende de um valor limite, *threshold*, que determina que células do MDT serão consideradas curso de água. Consequentemente, este valor, está directamente relacionado com o comprimento total e o número de ramificações da hidrografia, podendo isto resultar numa rede mais ou menos densa e na alteração da ordem dos cursos de água da bacia. Devido à subjectividade inerente ao estabelecimento deste valor limite, optou-se por utilizar a rede hidrográfica geocodificada¹⁹, publicada pela APA (Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.), como referência para o estabelecimento do valor de *threshold* de forma a obter-se uma rede compatível com esta, em termos de classificação de Strahler.

Com vista à produção de perfis (ver secção 3.1), foram desenhados dois vectores nas direcções N/S e O/E, Figura 18, e extraiu-se o vector do rio Nabão do tema da rede de drenagem. Com esta informação, com o MDT e utilizando a ferramenta *Profile tool*, disponível como *plug-in* para o programa QGIS, foi possível extrair os valores de altimetria correspondentes para uma folha de cálculo e desenhados os gráficos de perfil (ver secção 3.1).

Para o estudo hipsométrico da BH utilizou-se a ferramenta *Hypsometric curves*, parte do conjunto de ferramentas de análise de dados matriciais do programa QGIS. Esta ferramenta aceita como parâmetros o MDT, o tema com o vector que delimita a BH e a distância entre curvas de níveis a considerar no estudo, produzindo um ficheiro CSV²⁰, com a informação da área da BH acumulada por intervalo de altimetria. Já a determinação das áreas das classes de declives e do sentido de orientação de vertentes foi feita através das ferramentas *Slope* e *Aspect* do *plug-in Terrain Analysis* do *software* QGIS. A informação da grelha de declividade foi transformada de graus em gradiente percentual e reclassificada de acordo

¹⁹ Rede hidrográfica GeoCodificada (SNIAMB – APA, 2016c). Disponível em: http://sniamb.apambiente.pt/infos/shpzip/vw_hidcod_25k_ptcont_3.zip

²⁰ *Comma-separated values*. Ficheiro de texto com dados em forma de tabela em que as colunas são separadas por vírgula ou outro caractere. Permite importação para folha de cálculo.

com as relações e classes da Tabela 13, tendo a grelha de sentido de orientação de vertentes sido reclassificada conforme a Tabela 14. Através da ferramenta *r.report*, obteve-se a informação das áreas ocupadas por cada classe. Estes mapas irão se apresentados e analisados na secção 3.

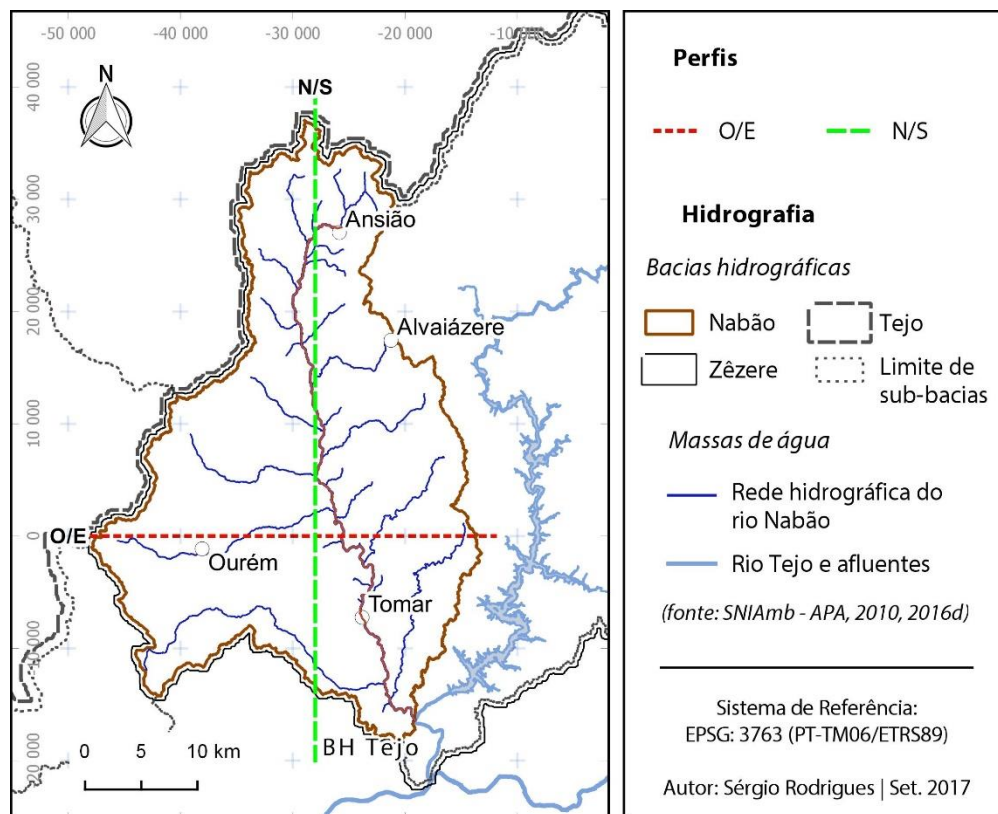


Figura 18. Localização dos vectores dos perfis topográficos N/S e O/E. Elaboração própria.

Com vista à caracterização demográfica, partiu-se da informação proveniente do Censos 2011 (INE, 2011), que foi trabalhada ao nível da subsecção estatística²¹ e apresentada cartograficamente agregada por freguesias²².

A informação disponibilizada pelo INE é fornecida sob forma de informação geográfica vectorial e informação estatística alfanumérica. A informação vectorial, relativa à base cartográfica, contém o território dividido em várias unidades territoriais: município, freguesia, secção estatística, subsecção estatística e lugar. A informação alfanumérica, em

²¹ Unidade territorial que identifica a mais pequena área homogénea de construção ou não, existente dentro da secção estatística. A secção estatística corresponde a uma área contínua da freguesia, com cerca de 300 alojamentos destinados à habitação (INE, 2014).

²² A informação estatística tem por base a organização administrativa existente em 2011. A Lei n.º 11-A/2013, de 28 de Janeiro, veio estabelecer uma reorganização administrativa do território das freguesias.

forma de tabela, reúne dados estatísticos (e.g. número de edifícios, número de residentes). A ligação da informação geográfica à estatística é feita através do campo *GEO_COD*, comum aos dois conjuntos de informação e pode ser concretizada em software SIG através de uma junção (*join data*).

Tabela 13. Relação entre declive medido em ângulos e em gradiente.

Ângulo ²³	≤ 5,71	11,31	16,70	21,80	> 21,80
Gradiente (%)	≤ 10	20	30	40	> 40

Tabela 14. Classificação das direcções de exposição de encosta (octantes).

Direcção	Norte	Nordeste	Este	Sudeste
Intervalo angular	0 – 22,5			
	337,5 – 360	22,5 – 67,5	67,5 – 112,5	112,5 – 157,5
Direcção	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste
Intervalo angular	157,5 – 202,5	202,5 – 247,5	247,5 – 292,5	292,5 – 337,5

Partindo do conjunto de dados disponível para o Centro de Portugal, extraiu-se a informação relativa à BH do Nabão (através da ferramenta *clip* e utilizando com o vector que delimita a BH) e removeram-se manualmente as subsecções que foram divididas pela operação, com excepção daquelas que estavam designadas como *residual* na tabela de atributos, indicando a existência de um baixo número de habitantes. Assim, embora as freguesias junto aos limites da BH possam estar fraccionadas, os valores populacionais a elas associados são os das respectivas subsecções estatísticas existentes dentro dos limites da BH.

Finalmente, recorreu-se à ferramenta *dissolve*, configurada de forma a realizar a soma das estatísticas das subsecções segundo as suas freguesias, ao mesmo tempo que simplifica a geometria vectorial para este nível.

²³ Declive: $\text{ângulo} = \text{cotg}(\text{gradiente})$

3. Caracterização do território

3.1 *Enquadramento geográfico, classificação, forma, geometria e características do relevo*

A BH do Nabão situa-se na zona centro de Portugal continental, tem a cabeceira no concelho de Ansião e a sua secção de referência no concelho de Tomar (Figura 19). Esta bacia, com uma área aproximada²⁴ de 997 km², estende-se pelos concelhos de Ansião, Pombal, Alvaiázere e Leiria, no distrito de Leiria, e pelos concelhos de Ourém, Torres Novas, Tomar, Ferreira do Zêzere e Vila Nova da Barquinha, no distrito de Santarém. Existe ainda uma pequena área da BH do Nabão situada no concelho de Penela, distrito de Coimbra.

Os concelhos de Ourém e de Tomar são os mais representados dentro da BH do Nabão, ocupando juntos, cerca de 60% da área desta bacia. Por outro lado, esta é responsável por drenar cerca de 81, 73, 71 e 63% das áreas dos concelhos de Ourém, Tomar, Alvaiázere e Ansião, respectivamente, sendo estes os concelhos que têm pelo menos metade do seu território drenado por ela. Na Figura 20 mostra-se o enquadramento do território da BH do rio Nabão e áreas adjacentes, em divisões administrativas tendo por base a CAOP de 2016.

Considerando as NUTS (Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos) de nível III, cerca de 72% da bacia hidrográfica do Nabão situa-se no Médio Tejo e quase 28%, incluindo a cabeceira, situa-se na Região de Leiria. Existe ainda uma pequena parte, menos de 0,3% da área total, na Região de Coimbra.

A bacia em estudo é uma sub-bacia da do rio Zêzere que, por sua vez, faz parte da BH do rio Tejo. Na Figura 19 apresenta-se a relação espacial entre estas três bacias bem como o seu enquadramento geográfico.

²⁴ Área projectada sobre o elipsóide de referência GRS80.

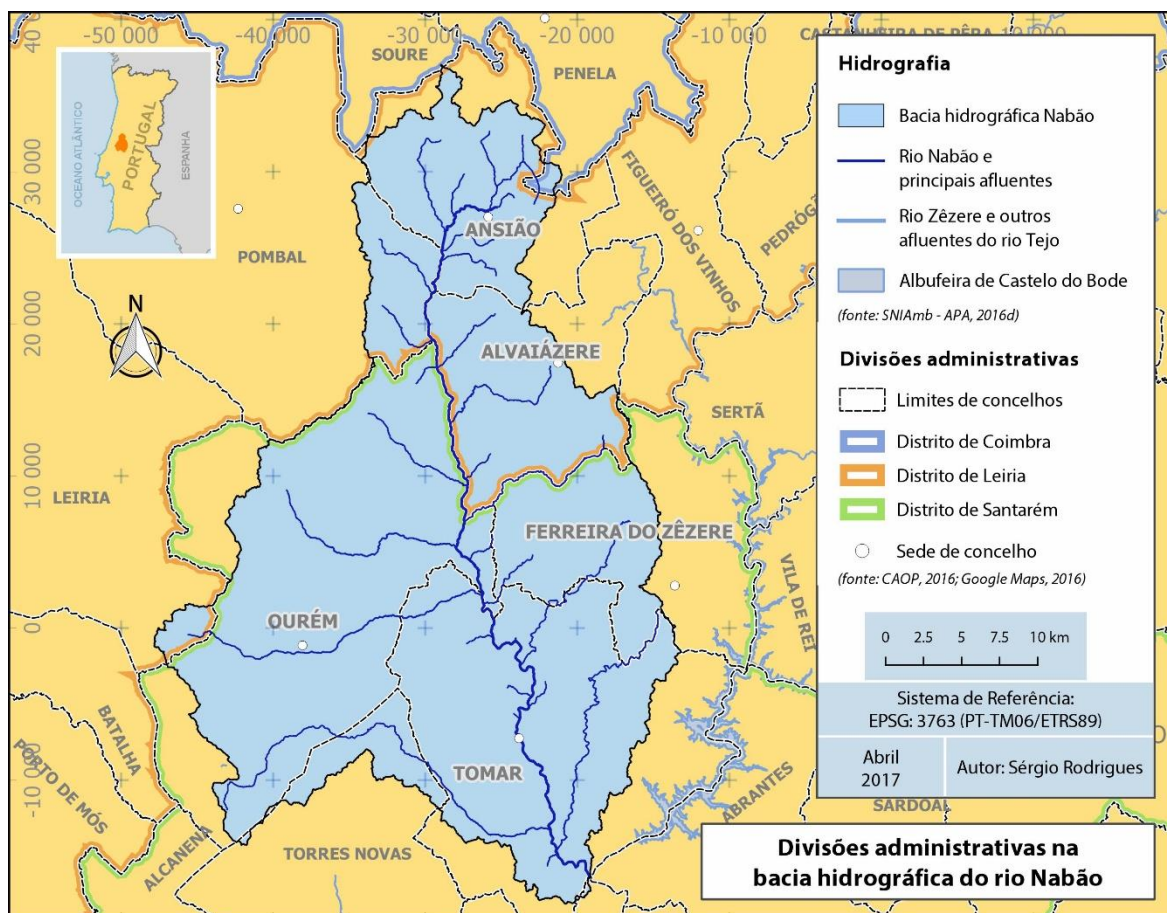


Figura 19. Divisões administrativas na bacia hidrográfica do rio Nabão. Elaboração própria.

Observando a Figura 21, verifica-se que a BH do Nabão apresenta um relevo diversificado. Tem uma variação de altitude de 633 metros entre o ponto mais alto (657 metros, na Serra d'Aire a SO) e o ponto mais baixo (confluência com o rio Zêzere a SE, 24 metros). De salientar a serra de Alvaiázere, a NE, que ultrapassa os 600 metros de altitude, a Serra de Sicó, a NO, com cerca de 550 metros e a Serra da Lousã, a N, que atinge os 340 metros.

A análise hipsométrica, Figura 22 e Figura 23, indica uma prevalência de altitudes entre os 200 e os 300 metros, numa área aproximada de 424 km², que corresponde a 42,6% da área da BH. A classe altimétrica dos 100 aos 200 metros é a segunda mais relevante, ocupando 374 km², cerca de 38% da área total. Verifica-se assim que mais de 80% do território da bacia tem uma cota entre os 100 e os 300 metros. Por último, apenas 0,4% (4 km²) do território está acima dos 500 metros. A altitude média é de 208 metros. Cerca de 495 km² do território têm uma altitude superior.

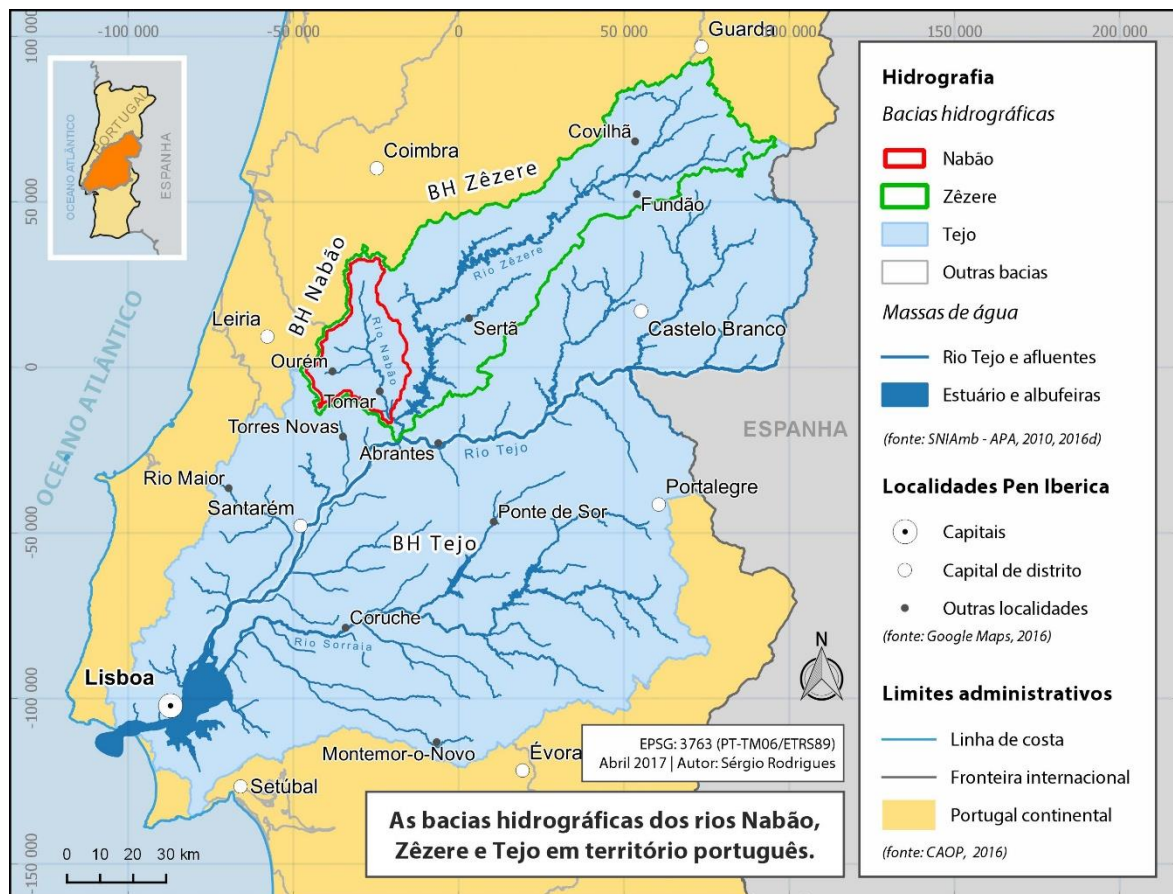


Figura 20. Enquadramento geográfico da bacia hidrográfica do Nabão. Elaboração própria.

O perfil topográfico N/S (Figura 24), revela um aumento tendencial de altitude no sentido de sul para norte (jusante para montante). Observa-se igualmente um aumento considerável da altimetria entre as ribeiras da Beselga e de Seiça. O perfil O/E (Figura 24), revela um vale na zona central da bacia, no qual os limites da bacia apresentam cotas mais elevadas e o rio Nabão mais baixas (como seria de esperar). Pode concluir-se que a BH apresenta uma maior simetria altimétrica na direcção O/E em contraposição à N/S, claramente assimétrica.

A carta de declives da BH do rio Nabão, Figura 25, evidencia uma predominância de declives abaixo dos 20%. Com efeito, verifica-se que 84,5% (843,1 km²) do território está abaixo desse valor de declive (Tabela 15); 46,9% (467,8 km²) apresenta declives inferiores a 10% e apenas 3% (30 km²) declives acima 30%.

Na Figura 26 apresenta-se a carta de orientações de encostas. O território apresenta uma distribuição homogénea (Figura 26, Tabela 16), com 14,3% e 14,4% das vertentes expostas

a SO e a O, respectivamente. As vertentes viradas a N, representam 9,7% da área da bacia, sendo as menos frequentes.

Sob o ponto de vista geológico, o Maciço Hespérico português inclui dois grandes grupos litológicos: os Metassedimentos do Paleozóico, Câmbrico e Precâmbrico e os Granitóides. A BH do Nabão localiza-se na Zona de Ossa Morena, sendo esta zona complexa no que respeita à geologia (Figura 27). Nela se encontram diversas formações polimetamórficas do Precâmbrico, do Câmbrico e Silúrico, bem como do Devónico Superior. Por Tomar, passa igualmente uma zona cizalhante a faixa Blastomilonítica. Grande parte do território a norte da cidade de Tomar encontra-se na unidade morfoestrutural da Orla Ocidental, Figura 27 e Figura 28, com predominância de formações sedimentares detríticas. Esta unidade é dominada por calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos e margas do período jurássico. Bem como por arenitos, conglomerados, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos e margas do período paleogénico. Na Orla Ocidental destaca-se ainda uma faixa de conglomerados, arenitos, calcários, calcários dolomíticos, calcários margosos e margas do período jurássico.

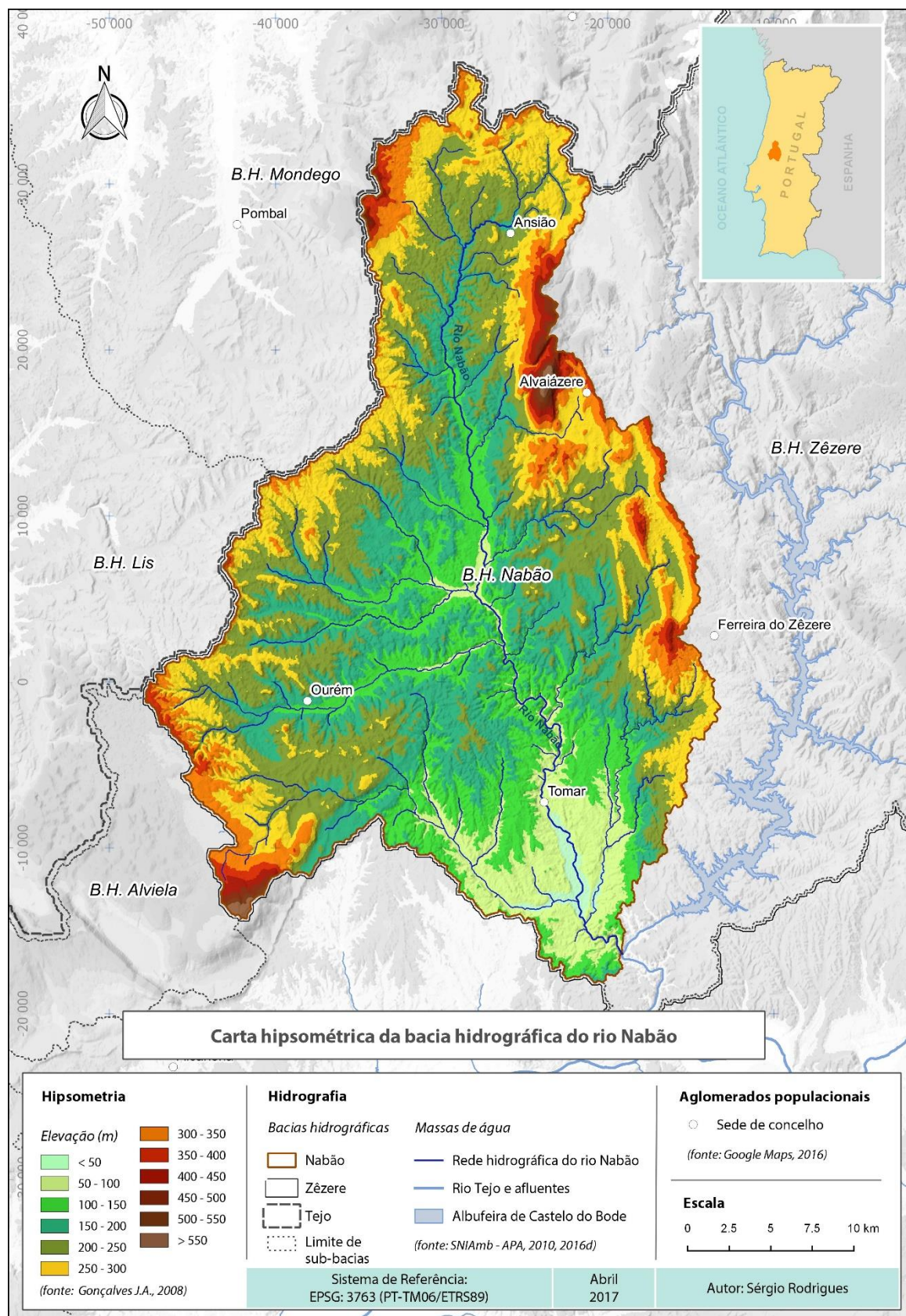


Figura 21. Carta hipsométrica da BH do rio Nabão. Elaboração própria.

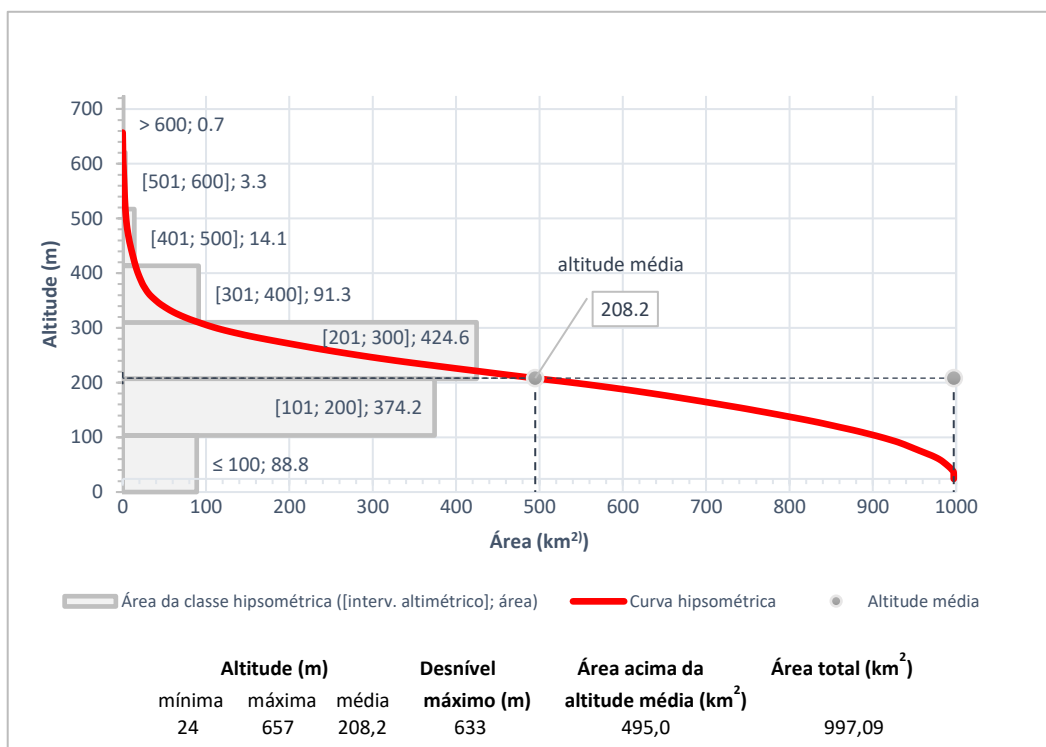


Figura 22. Distribuição de frequências altimétricas da bacia do rio Nabão. Elaboração própria.

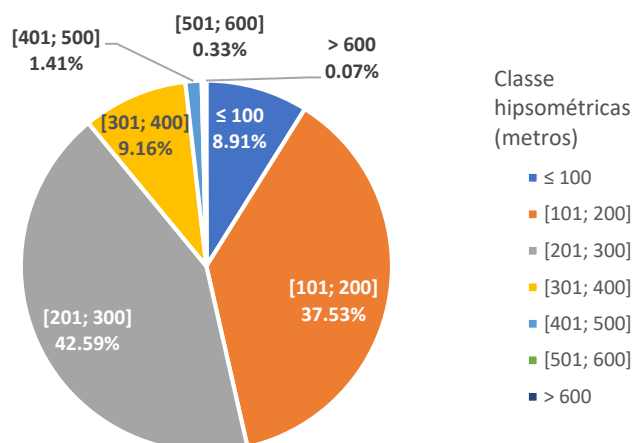


Figura 23. Área ocupada por classe hipsométrica (%). Elaboração própria.

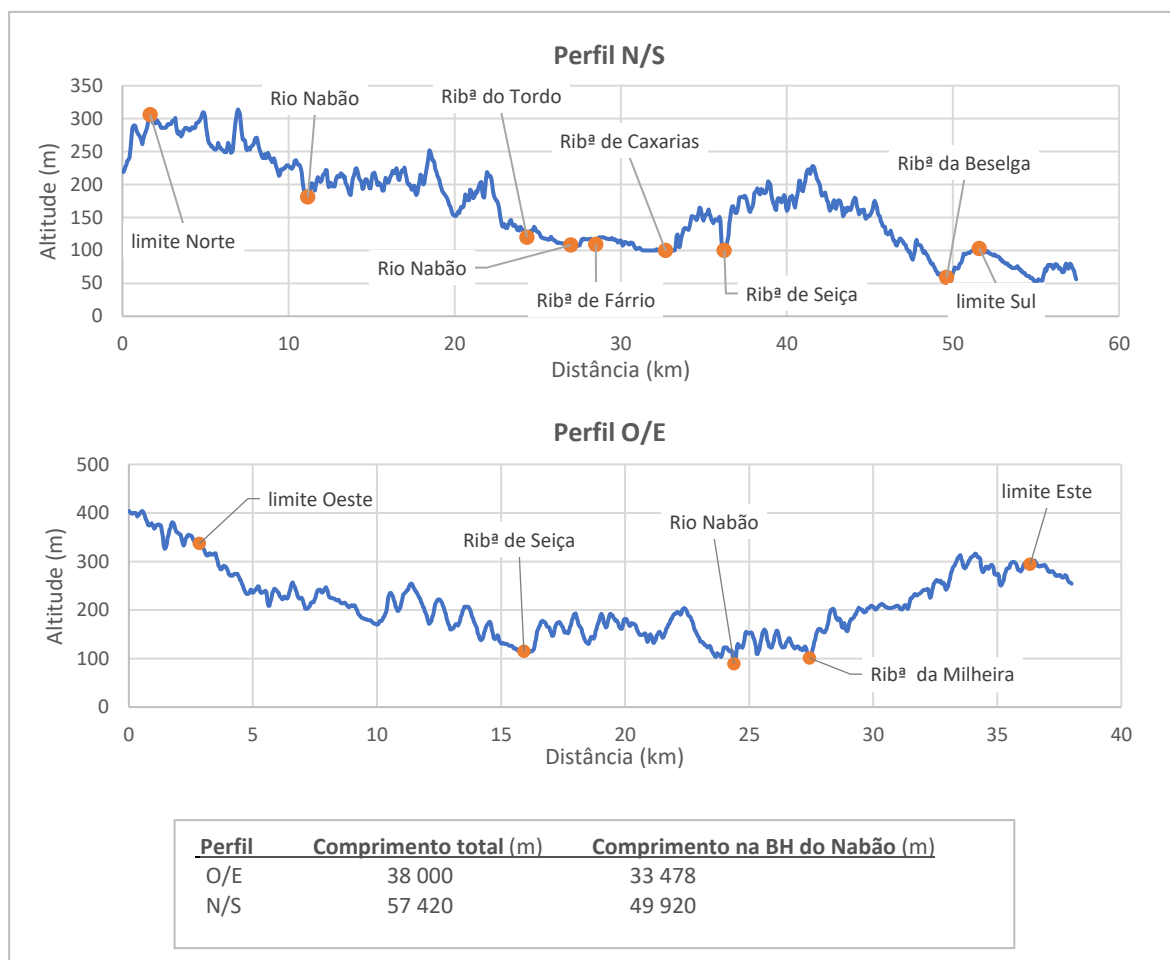


Figura 24. Perfis topográficos Norte/Sul e Oeste/Este ilustrativos do relevo da BH do Nabão. Elaboração própria.

Tabela 15. Área ocupada por classe de declives. Elaboração própria.

Classe de declive (%)		≤ 10	11 - 20	21 -30	31 - 40	> 40
Área	km²	467,8	375,3	117,0	24,3	6,0
	%	46,9	37,6	11,7	2,4	0,6

Tabela 16. Área ocupada por sentido de exposição de encostas. Elaboração própria.

Sentido de exposição		Norte	Nordeste	Este	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste
Área	km²	96,9	119,6	137,7	127,4	123,9	142,5	143,2	104,7
	%	9,7	12,0	13,8	12,8	12,4	14,3	14,4	10,5

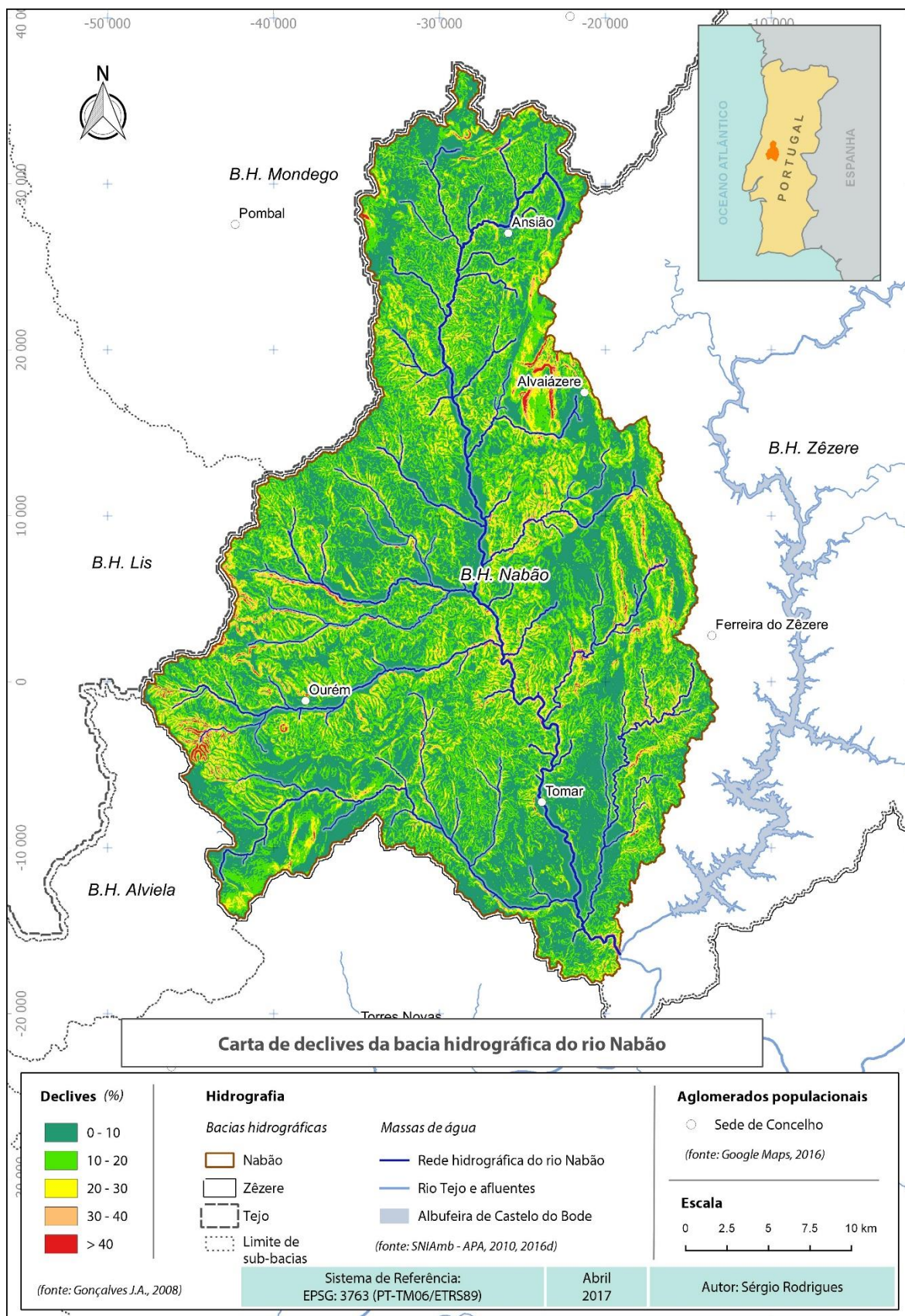


Figura 25. Carta de declives da BH do rio Nabão. Elaboração própria.

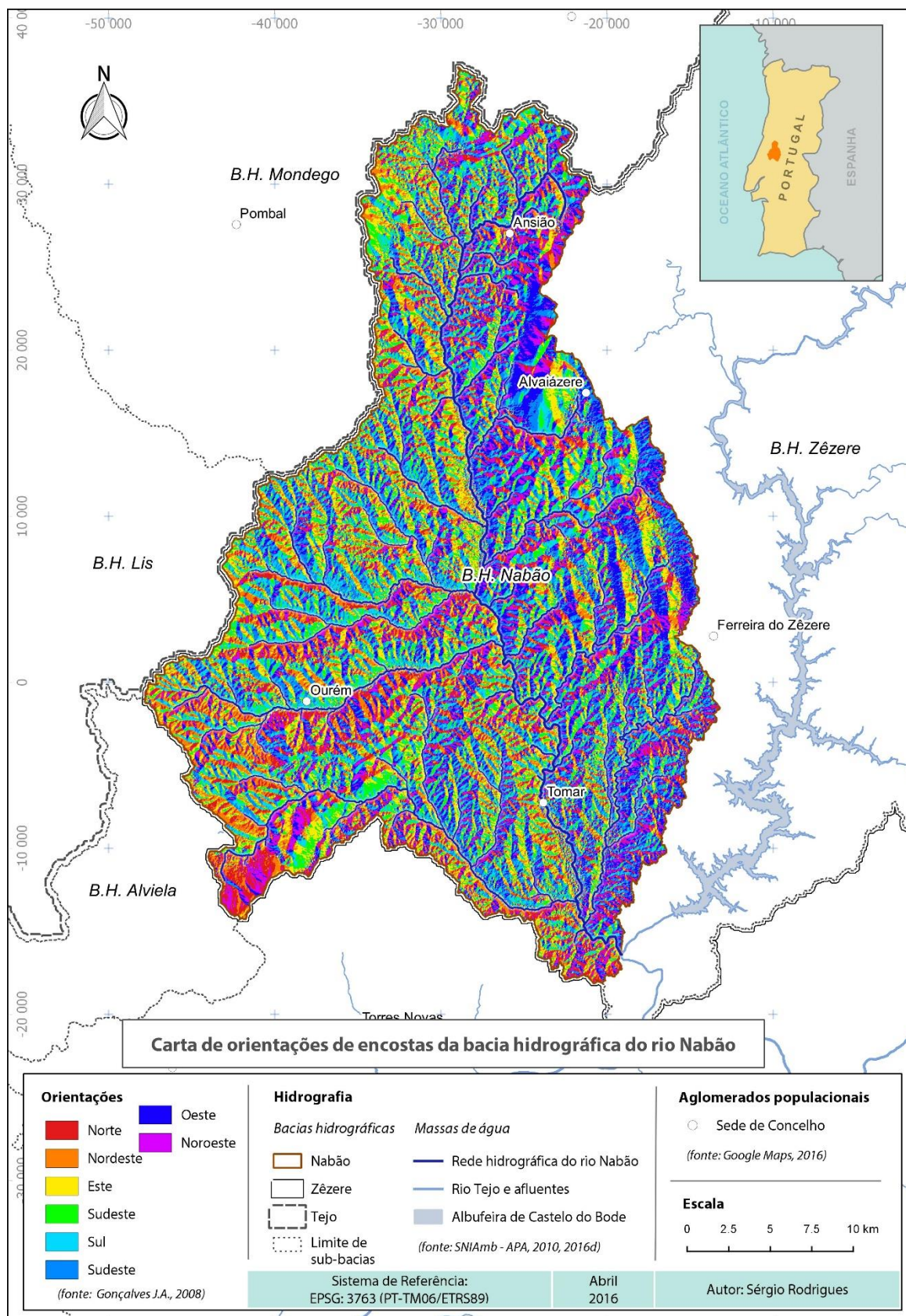


Figura 26. Carta de orientações de encostas da BH do rio Nabão. Elaboração própria.

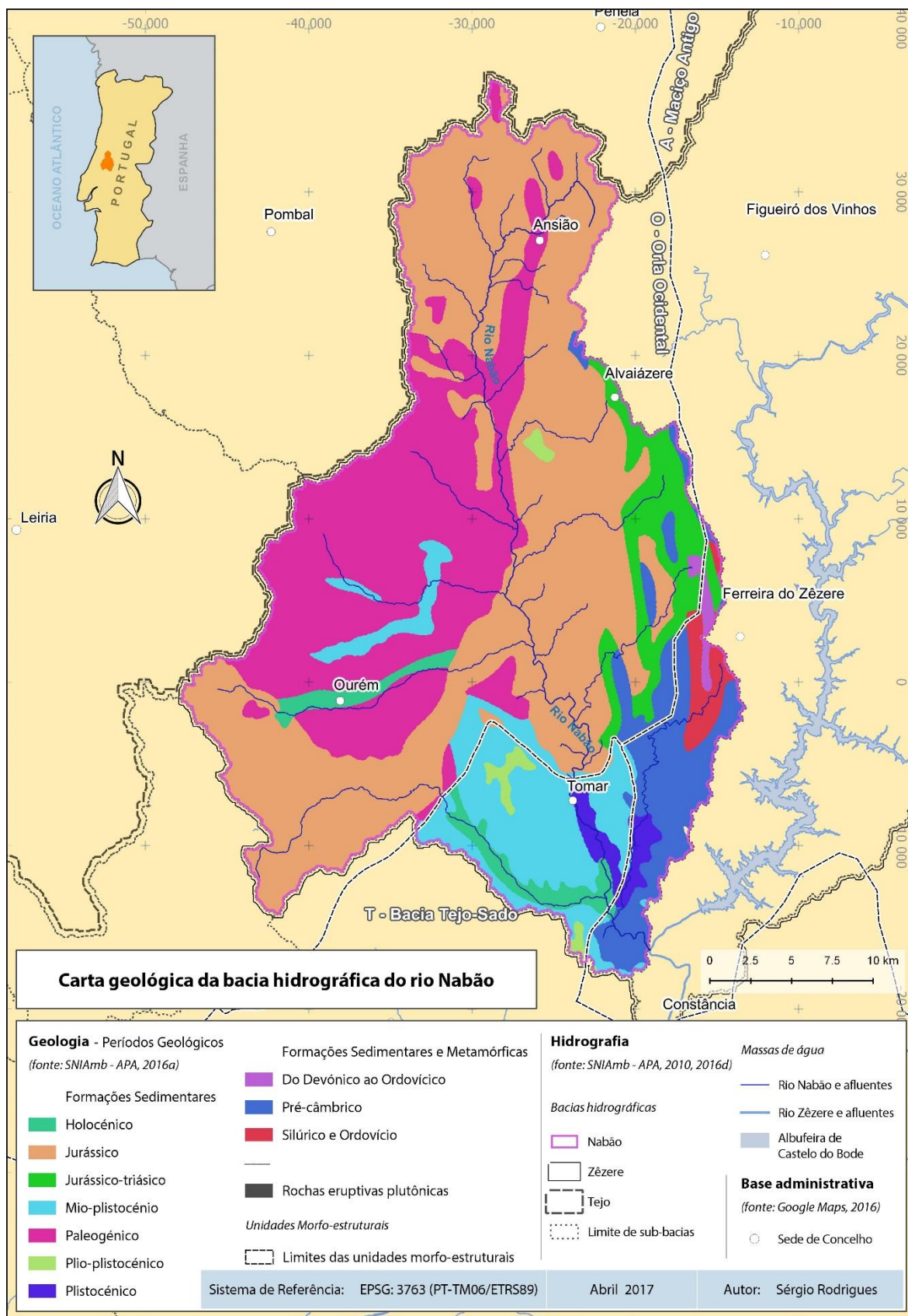


Figura 27. Carta geológica da BH do rio Nabão.

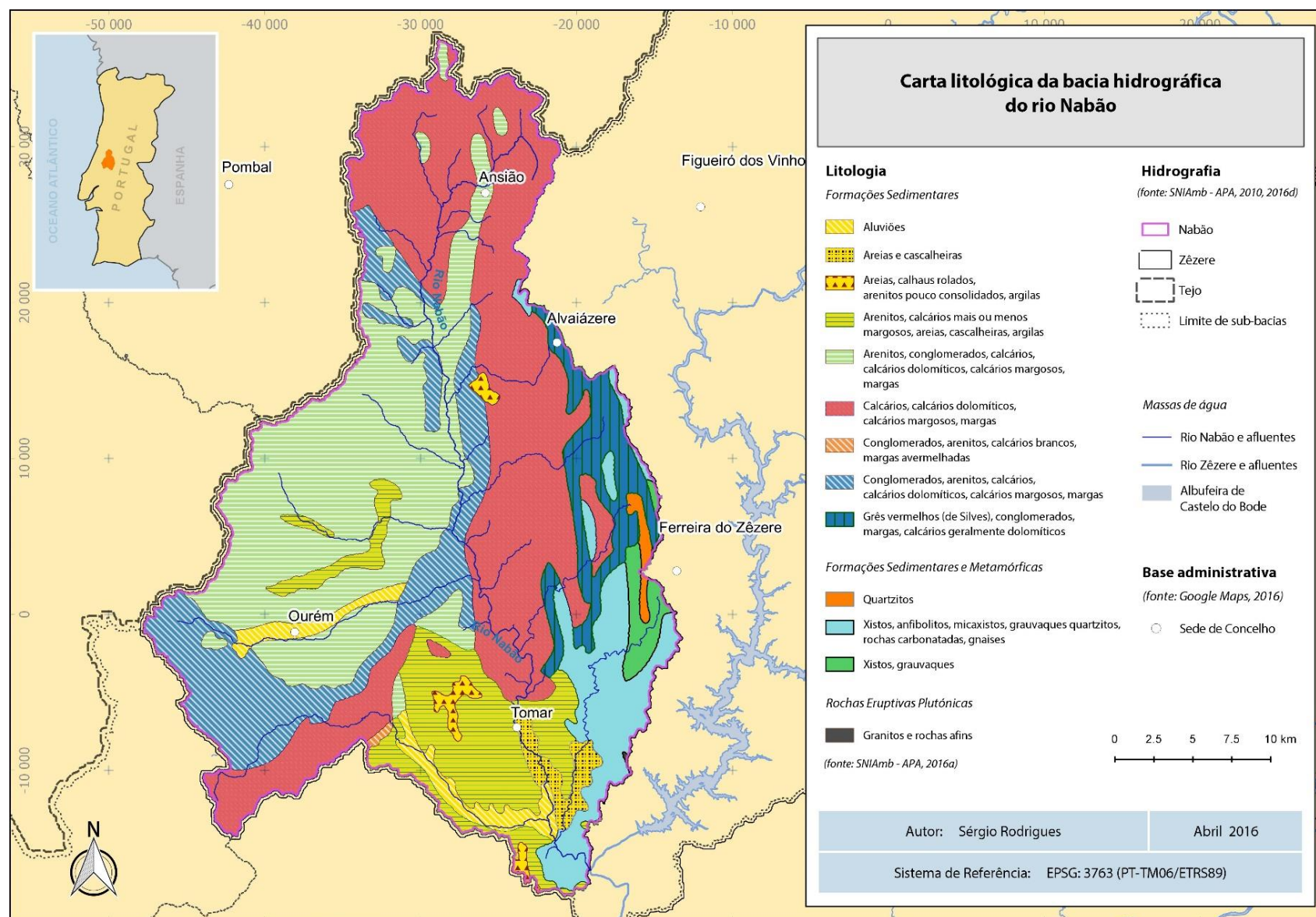


Figura 28. Carta litológica da BH do rio Nabão. Elaboração própria.

O Sudeste apresenta duas unidades morfoestruturais separadas num eixo N/S: a este a Bacia Tejo-Sado e a oeste o Maciço Antigo. A Bacia Tejo-Sado é dominada pelos arenitos calcários de origem mio-pleistocénica. A metade mais próxima da foz do percurso da ribeira da Beselga assenta em aluviões de origem holocénica, sendo que boa parte do percurso do rio Nabão, a sul de Tomar, assenta em areias e cascalheira do período pleistocénico. A área da bacia ocupada pelo Maciço Antigo tem origem no período pré-câmbrico sendo constituída maioritariamente por xistos, anfíbolitos, grauvaques quartzitos, rochas carbonatadas e gnaisses.

A Figura 29 mostra a distribuição do tipo de solo na BH do Nabão, que segue a classificação da (FAO, 2006) que classifica os solos em nove grandes grupos. Na BH encontram-se basicamente solos do grupo 5, solos condicionados pela sua juventude (Cambissolos), do grupo 9 solos condicionados por movimentos pronunciados de argilas ou materiais férricos e húmidos (Luvissolos) e os Litossolos que se encontram na classe dos solos incipientes. O tipo de solo, reveste-se de grande relevância no estudo do risco de cheias. Os Litossolos caracterizam-se pela sua pouca profundidade, menos de 30 cm, estando assentes sobre rocha, por isso secam ou alagam com facilidade e rapidez. Associados a um terreno com declive pronunciado, erodem facilmente porque são arrastados pela água da chuva. Os Cambissolos caracterizam-se por serem jovens, sendo moderadamente desenvolvidos sobre a rocha mãe. Não apresentam grande quantidade de argila e matéria orgânica, sendo o solo dominante na BH. Os Luvissolos, caracterizam-se pela presença de um horizonte no qual predomina a argila a determinada profundidade. Assentes quase sempre sobre rochas graníticas, dominam os terrenos planos, sendo propensos aos movimentos de massa em vertente quando o declive do terreno aumenta.

A carta de uso e ocupação do solo evidencia uma mancha correspondente às florestas, meios naturais e semi-naturais (Figura 30 e Figura 31), que ocupa 61,1% do território da BH. As áreas agrícolas e agro-florestais ocupam 30,8%. Os territórios artificializados e os corpos de água são as classes com menor representação, 8% e 0,1% respectivamente.

A BH do rio Nabão é exorreica com drenagem para o rio Zêzere. Este rio desagua no Tejo que, por sua vez, escoia para o Oceano Atlântico. Trata-se de uma bacia que segue a orientação do rio Nabão (aproximadamente N/S), cujo comprimento máximo do seu eixo é de 52 km. No eixo E/O, possui um comprimento máximo de 35 km (na Figura 32).

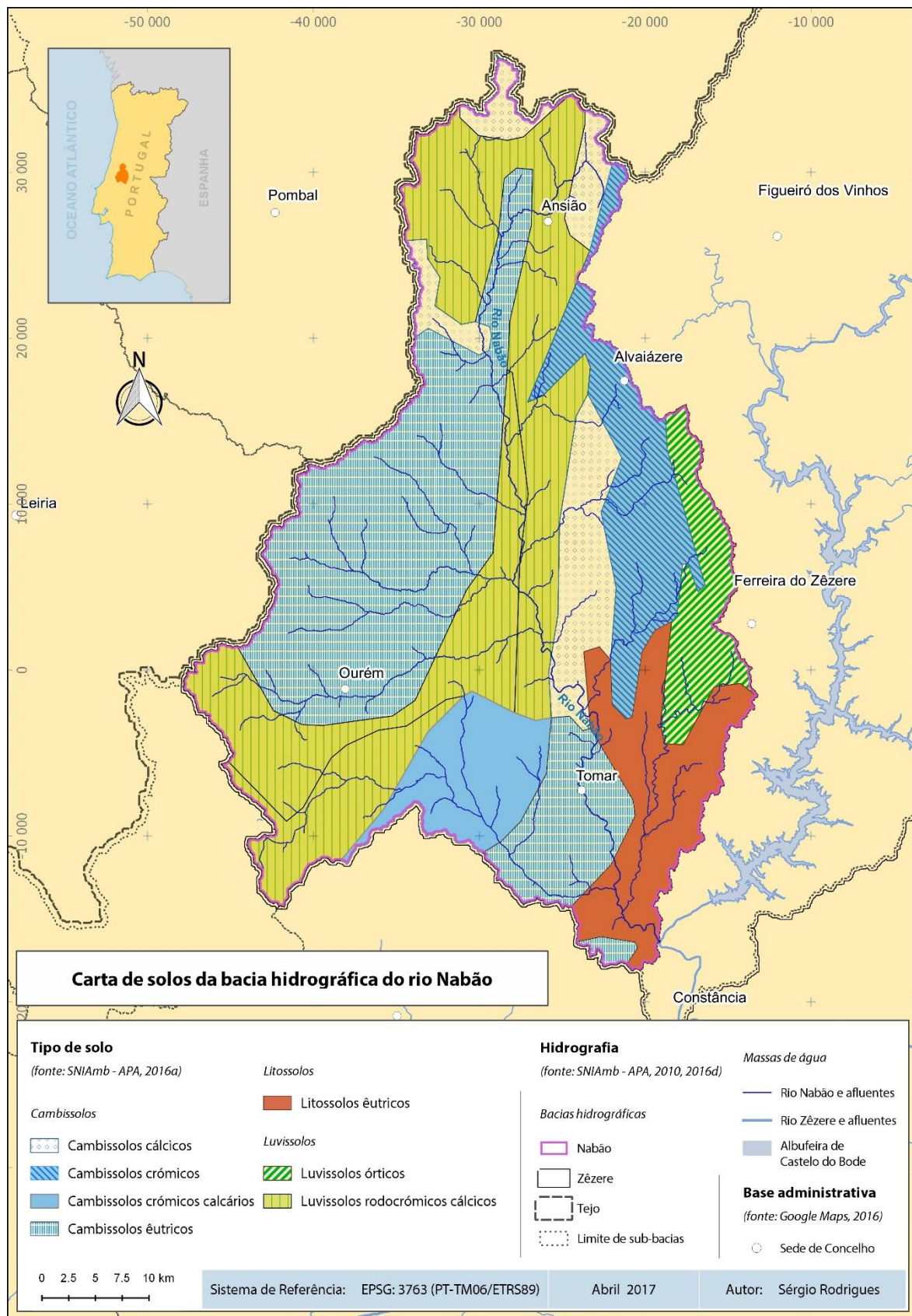


Figura 29. Carta de solos da BH do Nabão. Elaboração própria.

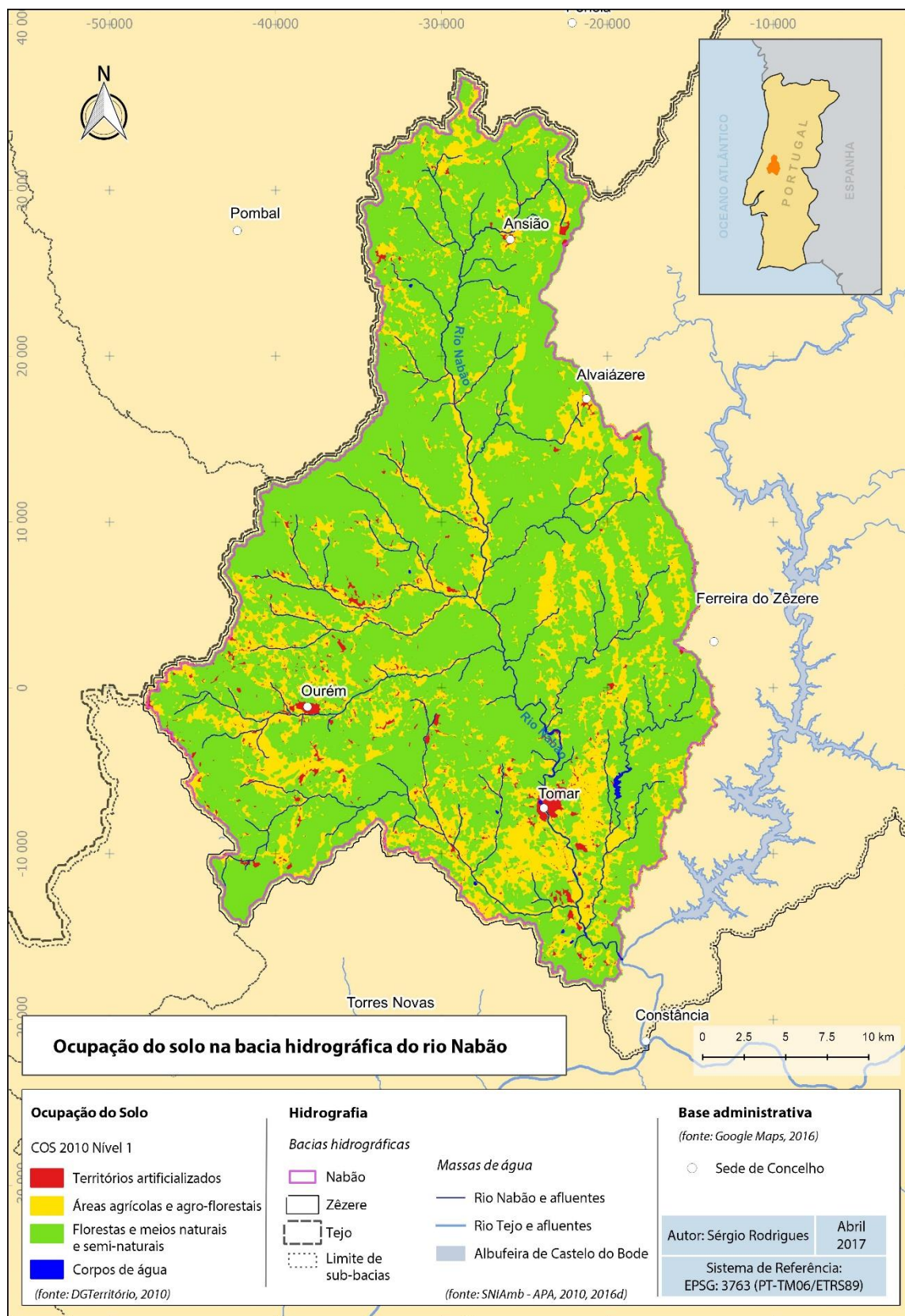


Figura 30. Carta de uso e ocupação do solo da BH do rio Nabão.

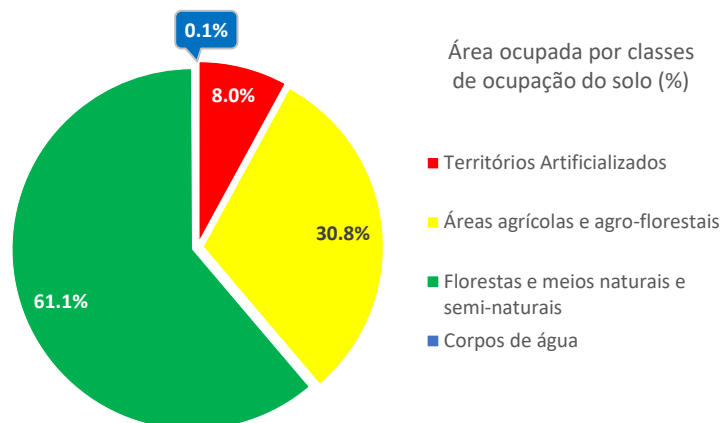


Figura 31. Área ocupada pelas classes de uso e ocupação do solo (%). Fonte: COS 2010.

Quanto à sua forma, esta bacia, define-se entre alongada e arredondada, apresentando um coeficiente de compacidade de 2,39 e factor forma de 0,36. No entanto, considerando apenas a área a sul da linha 1, definida na Figura 32, os valores do coeficiente de compacidade e do factor de forma alteram-se para 1,95 e 0,59, respectivamente, representando 83% da área total da bacia.

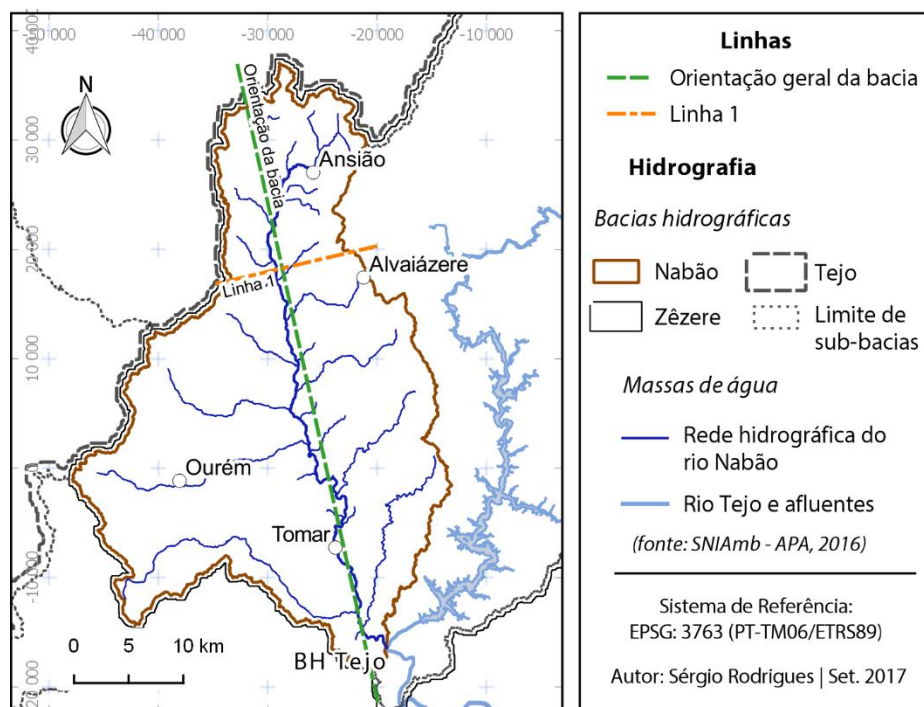


Figura 32. Localização de linhas de referência na bacia hidrográfica do rio Nabão.

Tabela 17. Características geométricas da bacia hidrográfica do Nabão.

	BH Nabão	Área da bacia a sul da Linha 1 (% da BH Nabão)
Área (km²)	997,06	821,33 (82%)
Perímetro (km)	269,65	199,25 (74%)
Comprimento orientação eixo geral do rio (km)	52,5	37,31 (71%)
Factor forma (Horton)	0,36	0,59
Coefficiente de compacidade	2,39	1,95

3.2 *Hidrografia e hidrometria*

Tal como anteriormente referido, o rio Nabão tem a sua cabeceira na zona norte da vila de Ansião, concelho homónimo, percorre aproximadamente 62 km até à sua foz separando o extremo das freguesias de Asseiceira e de São Pedro de Tomar, concelho de Tomar. De facto, o rio delimita estas freguesias ao longo de 5,6 km, freguesias de que é fronteira, e após os quais une as suas águas com o rio Zêzere. Embora os quilómetros iniciais do seu percurso tenham uma direcção predominante NE/SO e a sua inserção no rio Zêzere seja feita numa direcção aproximada NO/SE, o rio Nabão apresenta, globalmente, uma direcção entre N/S e NNO/SSE.

Ao longo do seu trajecto, o rio serve de fronteira administrativa em 24,4 km (entre concelhos, em quatro troços, Tabela 18).

O perfil longitudinal do rio Nabão (Figura 33) permite identificar as principais áreas urbanas, a inserção dos principais afluentes e as estações hidrométricas, existentes. A cabeceira do rio Nabão encontra-se a uma cota de 195,6 metros e a sua foz a 25,2 metros. A altitude e declives médios são de 101,6 metros e 0,3%, respectivamente.

Tabela 18. Distribuição do percurso do rio Nabão por concelhos.

Troço (km)	Comprimento do troço (km)	Localização (concelho)
0 - 6,0	6,0	Ansião
6,0 - 9,2	3,2	Fronteira Pombal - Ansião
9,2 - 13,0	3,8	Fronteira Pombal - Alvaiázere
13,0 - 27,9	15,0	Fronteira Ourém - Alvaiázere
27,9 - 33,7	5,7	Ourém
33,7 - 36,1	2,4	Fronteira Ourém - Tomar
36,1 - 61,6	25,6	Tomar
Comprimento total em fronteira concelhia (km – % do total)		24,4 – 38,1%

A Figura 34, que apresenta a rede hidrográfica da bacia do rio Nabão, evidencia o seu padrão do tipo dendrítico. Segundo a classificação da rede de drenagem de Strahler (1964), o seu rio principal é de 5ª ordem na sua foz (Figura 34). A bacia é de magnitude 203, segundo classificação de Shreve (1966), apresentando uma densidade de drenagem de 1,39 km/km², valor que indica tratar-se de uma bacia bem drenada (Tabela 20).

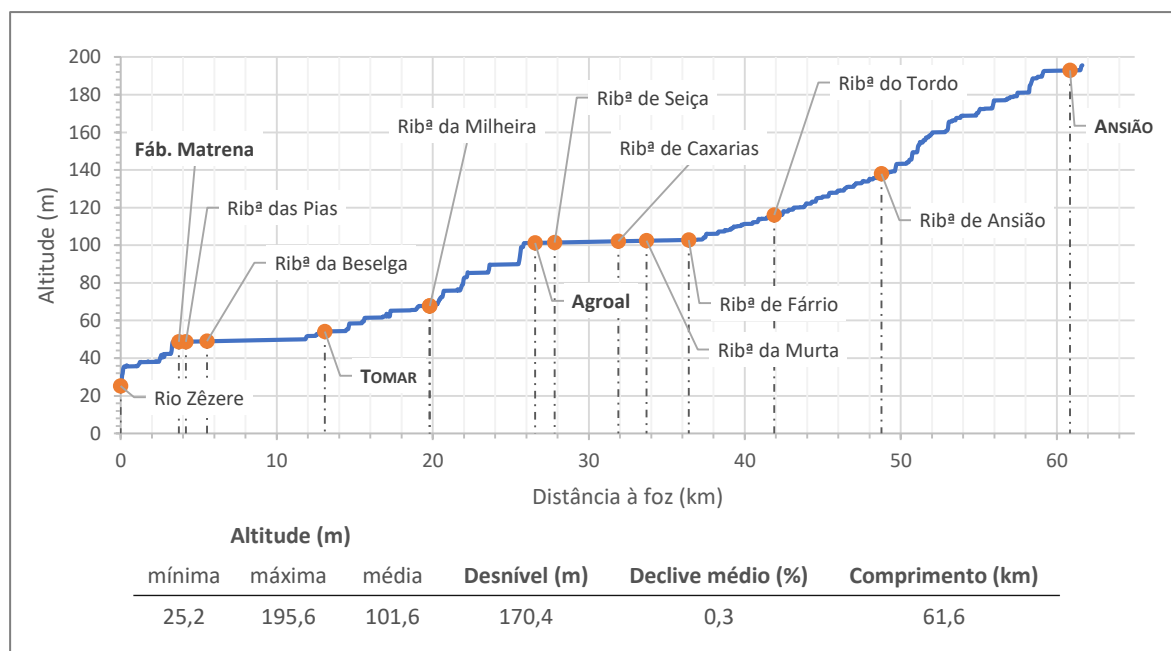


Figura 33. Perfil longitudinal do rio Nabão e algumas estatísticas associadas.

Dos seus principais afluentes, listados na Tabela 19, destacam-se de montante para jusante, na margem esquerda, a ribeira da Murta, com 54,72 km² de área de drenagem e a ribeira de Pias com 82,36 km² e na margem direita a ribeira de Caxarias com 134,15 km², a ribeira de Seixa com 102,37 km² e a ribeira da Beselga com 220,96 km² de área de drenagem.

Na BH do Nabão existem duas estações hidrométricas, a do Agroal e a da Fábrica da Matrena. As suas localizações, bem como as respectivas bacias de drenagem, são apresentadas na Figura 35. Esta ilustração mostra ainda, as localizações e as bacias de drenagem de dois pontos de interesse, o Açude dos Frades, situado dentro da cidade de Tomar e o Açude de S. Lourenço, no extremo jusante desta. Na

Tabela 21 listam-se as principais características geométricas das bacias de drenagem das estações hidrométricas e dos dois açudes considerados.

Tabela 19. Principais afluentes do rio Nabão (de montante para jusante) e áreas das respectivas bacias hidrográficas.

Curso de água	Margem	Área da bacia hidrográfica (km²)	Outras designações
Ribeira de Ansião	direita	16,43	-
Ribeira do Tordo	esquerda	41,16	-
Ribeira de Fárrio	direita	26,24	-
Ribeira da Murta	esquerda	54,72	-
Ribeira de Caxarias	direita	134,15	-
Ribeira de Seixa	direita	102,37	Ribeira da Sabacheira
Ribeira da Milheira	esquerda	62,82	-
Ribeira da Beselga	direita	220,96	Rio Beselga
Ribeira de Pias	esquerda	82,36	Ribeira da Lousã

Tabela 20. Características do sistema de drenagem da bacia hidrográfica do Nabão

Hierarquia do rio principal na foz (Strahler)	5
Magnitude (Shreve)	203
Área (km ²)	997,1
Comprimento total dos cursos de água (km)	1386,2
Densidade de drenagem (km/km ²)	1,39

Tabela 21. Características geométricas de bacias de drenagem de pontos de interesse da BH do Nabão.

	EH Agroal	Açude de Pedra	Açude de S. Lourenço	EH Matrena
Área (km²)	606,48	705,72	713,72	985,44
(% BH Nabão)	(61%)	(71%)	(72%)	(99%)
Perímetro (km)	213,71	231,05	236,47	268,74
	(79%)	(86%)	(88%)	(99%)
Comprimento orientação eixo geral do rio (km)	32,46	39,34	42,12	49,46
	(62%)	(75%)	(80%)	(94,2%)
Factor forma (Horton)	2,43	2,44	2,48	2,40
Coefficiente de compacidade	0,95	0,64	0,56	0,41

3.3 *Clima*

O IPMA (2017) caracterizou o clima português com base nas normais climatológicas 1971-2001 a partir de dados de 21 estações meteorológicas distribuídas pelo território nacional. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Portugal Continental é maioritariamente *temperado*, do tipo C, e subtipo Cs, correspondente a um *clima temperado com Verão seco*. O território da BH do rio Nabão, em concreto, apresenta clima da variedade Csb, *Clima temperado com Verão seco e suave* (IPMA, 2017).

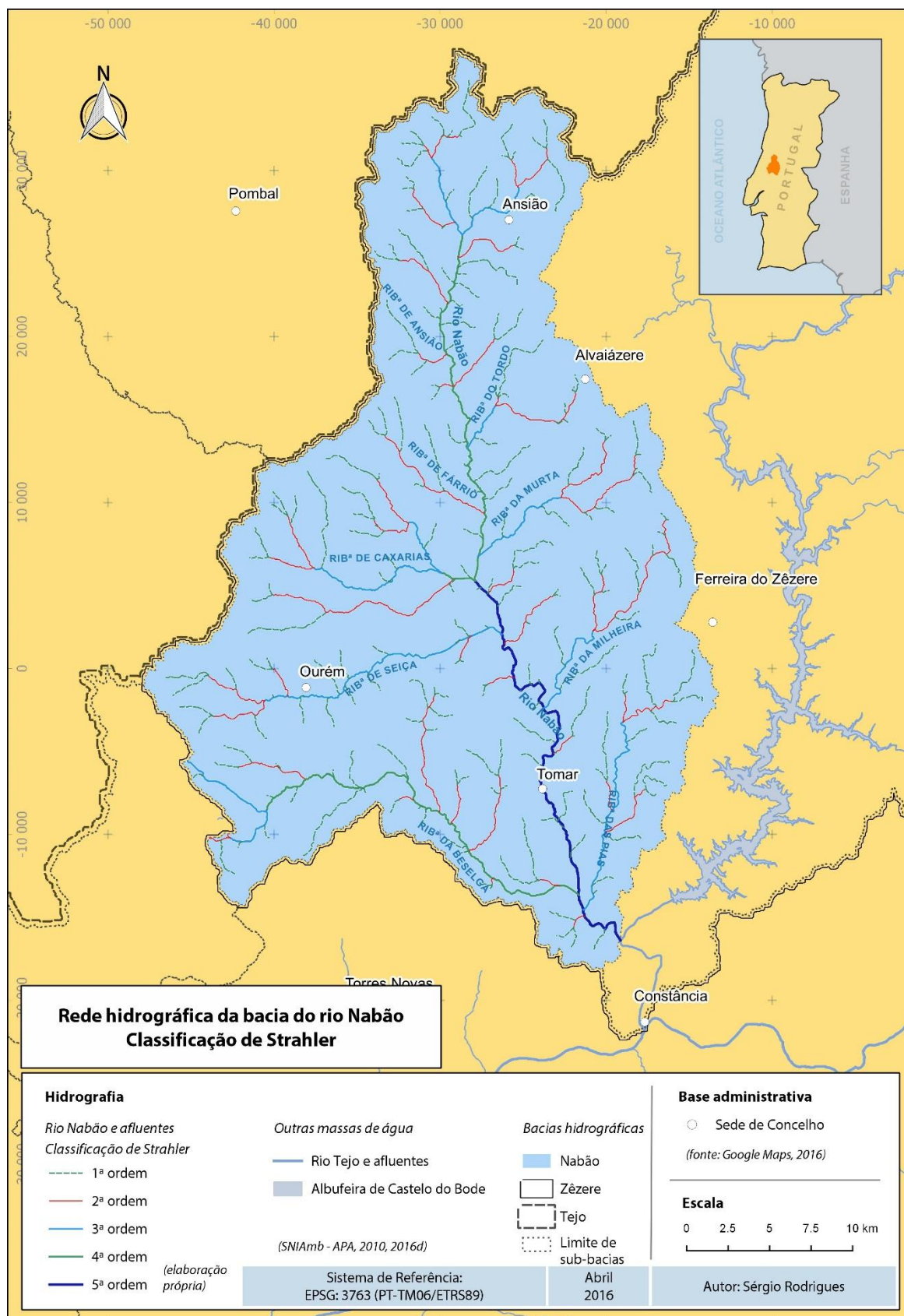


Figura 34. A rede hidrográfica da bacia do rio Babão e o ordenamento dos seus cursos de água segundo Strahler (1964). Elaboração própria.

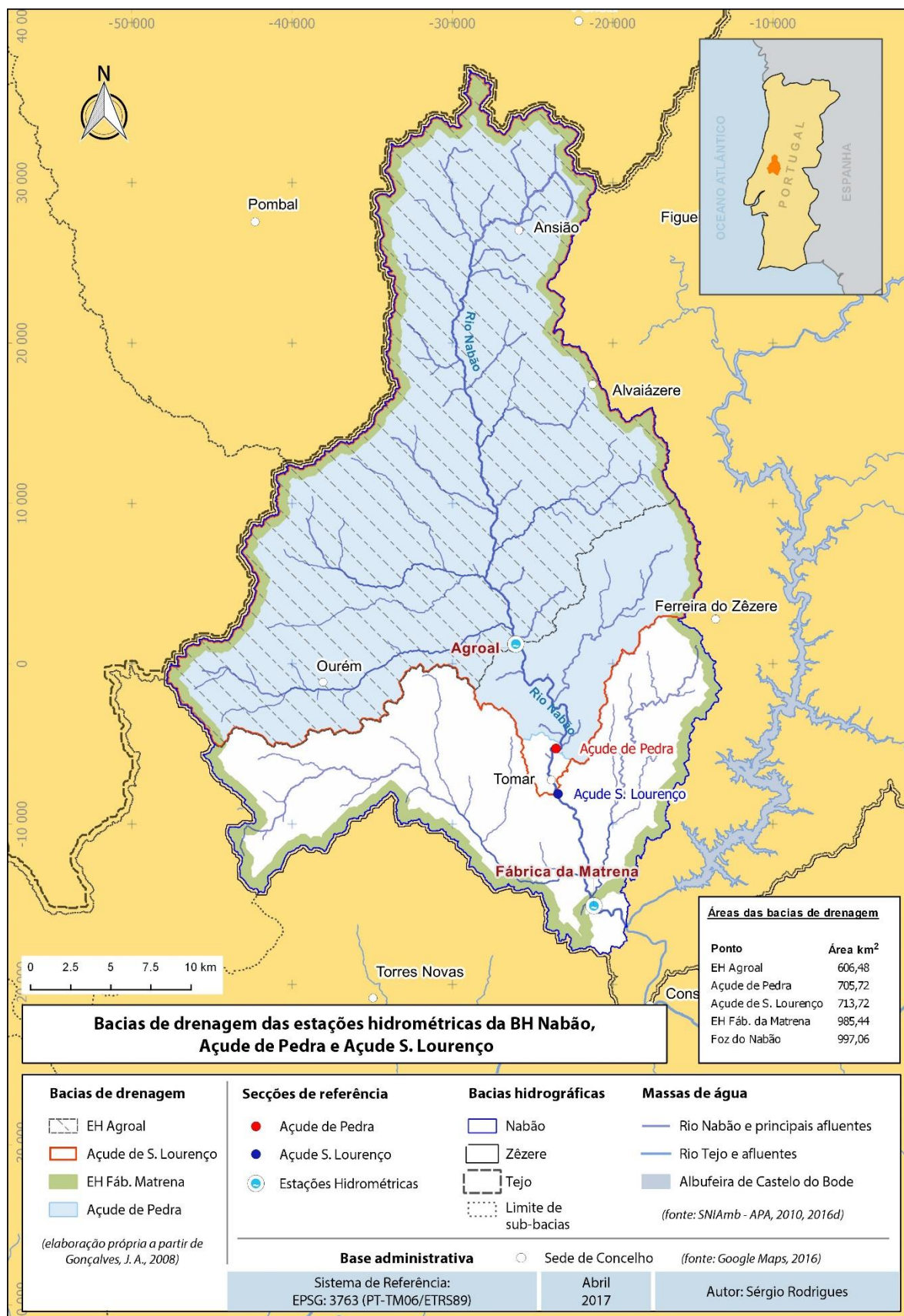


Figura 35. Bacias de drenagem das Estações Hidrométricas existentes na BH do rio Nabão.

Considerando a normal climatológica 1971-2000¹, a região do Médio Tejo tem uma temperatura média anual de 13,7°C. As temperaturas médias mensais, representadas a verde na Figura 36, apresentam os valores mais elevados em Julho e Agosto, 22°C e 23,4°C respectivamente. Por outro lado, as temperaturas médias mensais mais baixas ocorrem nos meses de Inverno entre Dezembro e Fevereiro (7,8°C, 7,4°C e 7,8°C, respectivamente).

A média mensal dos valores de temperatura máxima (Figura 36) oscilam entre 30,3°C em Agosto e 10,4°C em Janeiro. Já as temperaturas mínimas mensais variam entre 4,5°C em Janeiro e Fevereiro; e, 16,5°C em Agosto (Figura 36).

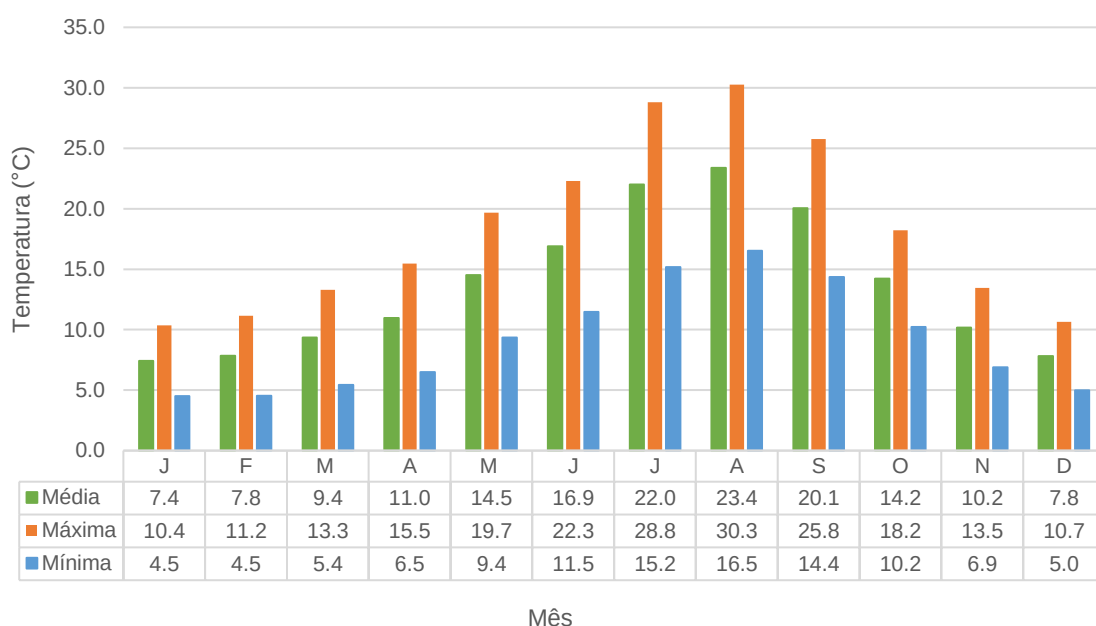


Figura 36. Temperaturas (°C) média, máxima e mínima mensais para o Médio Tejo no período 1971-2000¹. Adaptado de IPMA (2016).

No que diz respeito aos valores médios mensais extremos de temperatura, i.e., valor mais baixo das médias mensais da temperatura mínima e valor mais alto das médias da temperatura máxima, estes variam entre 1,7°C e 34,3°C, observados em Janeiro e Agosto, respectivamente (Figura 37).

Relativamente à precipitação, observa-se uma média anual de 790 mm (valores acumulados). Os meses mais chuvosos, Fevereiro e Março registam 110,78 mm e 114,92 m, e os meses de

¹ Normal climatológica: Histórico Simulado 1971-2000, Estatística: Média 30 anos, Modelo Regional: CLMcom-CCLM4-8-17, Modelo Global: CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (IPMA, 2016).

Julho e Agosto, meses com menos precipitação, valores de 4,03 mm e 6,46 mm, respectivamente. O diagrama ombrotérmico (usualmente associado ao índice xerotérmico), Figura 38, evidencia o período entre Julho e Setembro como o período seco do ano, altura em que a precipitação acumulada é duas vezes inferior ao valor médio da temperatura ($P < 2T$).

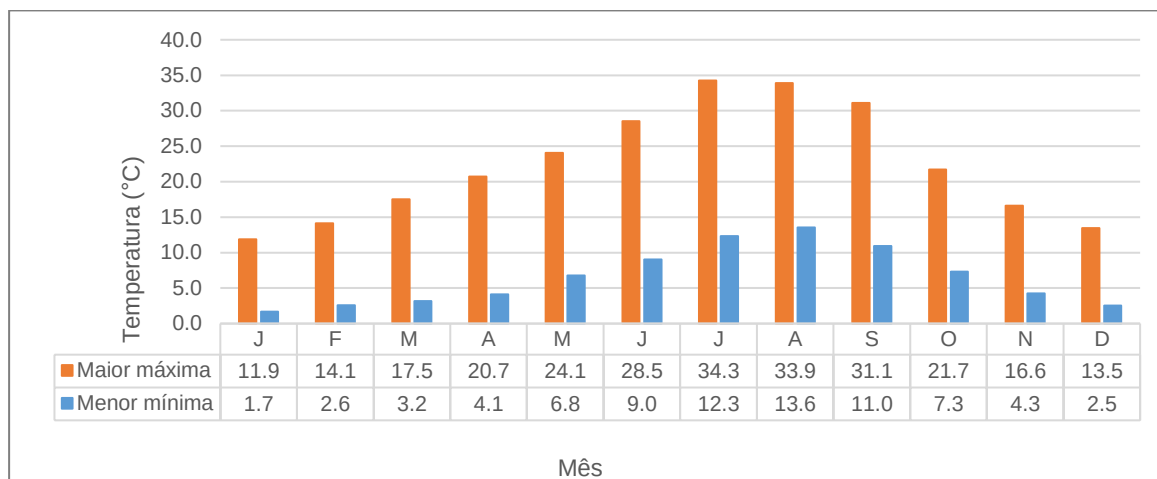


Figura 37. Valores médios mensais extremos de temperatura para o Médio Tejo no período 1971-2000². Adaptado de IPMA (2016).

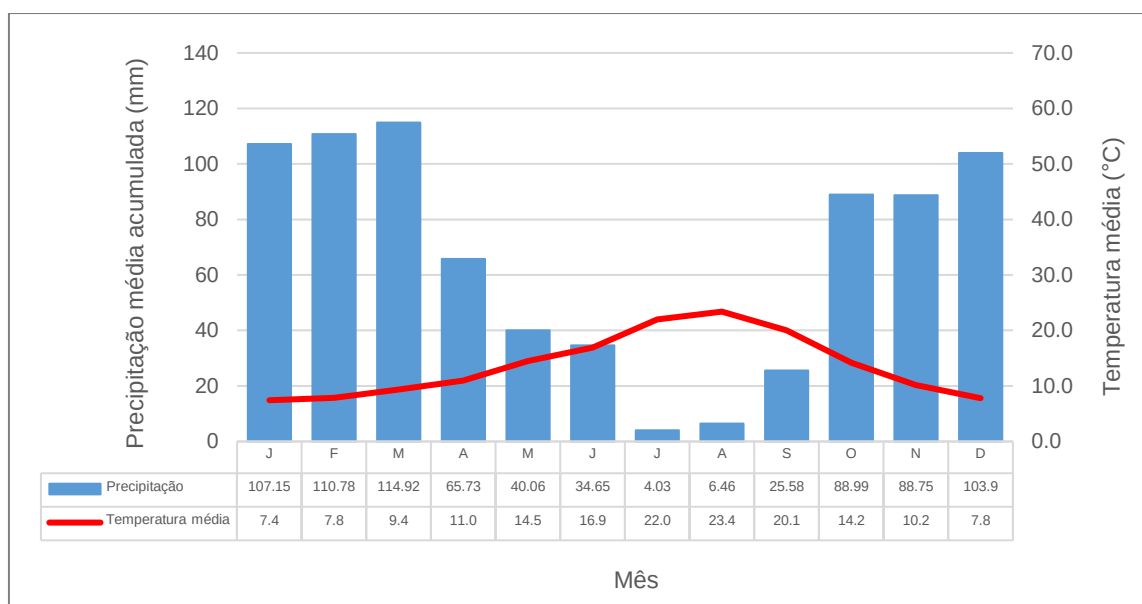


Figura 38. Diagrama ombrotérmico do Médio Tejo no período 1971-2000³. Adaptado de IPMA (2016).

² Normal climatológica: Histórico Simulado 1971-2000, Estatística: Média 30 anos, Modelo Regional: CLMcom-CCLM4-8-17, Modelo Global: CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (IPMA, 2016).

³ Normal climatológica: Histórico Simulado 1971-2000, Estatística: Média 30 anos, Modelo Regional: CLMcom-CCLM4-8-17, Modelo Global: CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (IPMA, 2016).

3.4 *Demografia*

Tendo por base os Censos 2011 (INE, 2011), o território da BH do Nabão, com 95 971 habitantes, possui uma densidade populacional de 96,2 habitantes por km². A classe etária dos 20 aos 64 anos é a mais representativa, com 56,7% dos indivíduos, seguida da classe de maiores de 65 anos com 24,5%. Os jovens, com menos de 20 anos, constituem o grupo etário menos representado, com 18,8% (Tabela 22).

A análise da distribuição da população pelas freguesias da BH (Bacia Hidrográfica) Figura 39) revela que as freguesias urbanas de S. João Baptista e Santa Maria dos Olivais, concelho de Tomar, são as freguesias com maior densidade populacional, com 728,7 e 425,6 habitantes por km², (12 616 e 5 593 habitantes, respectivamente). Por último, a parte do território da freguesia de Chancelaria, concelho de Torres Novas, que se encontra dentro da BH do Nabão possui uma densidade de 7,0 habitantes por km² (cerca de 65 habitantes), sendo o único com densidade abaixo dos 10 habitantes por km².

Esta análise, revela igualmente que é na zona da cidade de Tomar que a ocorrência de cheias irá ter um maior impacto socioeconómico, dado afectar uma grande parte da população deste Concelho.

Tabela 22. Estrutura etária da população residente na BH do Nabão (INE, 2011).

Classe etária	0 - 19	20 - 64	≥ 65	Total
N.º de residentes	18 080	54 362	23 529	95 971
(%)	(18,8)	(56,7)	(24,5)	

4. Inundações no rio Nabão

O histórico de cheias do rio Nabão reporta-se, essencialmente, à zona urbana de Tomar. Embora as cheias ocorram noutras zonas da bacia, o local onde o seu impacto é mais notório é na cidade de Tomar, tal como anteriormente referido. Esta urbe é dividida pelo rio, facto que a torna particularmente vulnerável às inundações. Na Tabela 23 listam-se as principais inundações referidas na bibliografia consultada, mostrando-se, na Figura 40, duas marcas de níveis históricos de inundações. Na Figura 41 apresentam-se fotografias das cheias de 2006 em dois pontos da cidade.

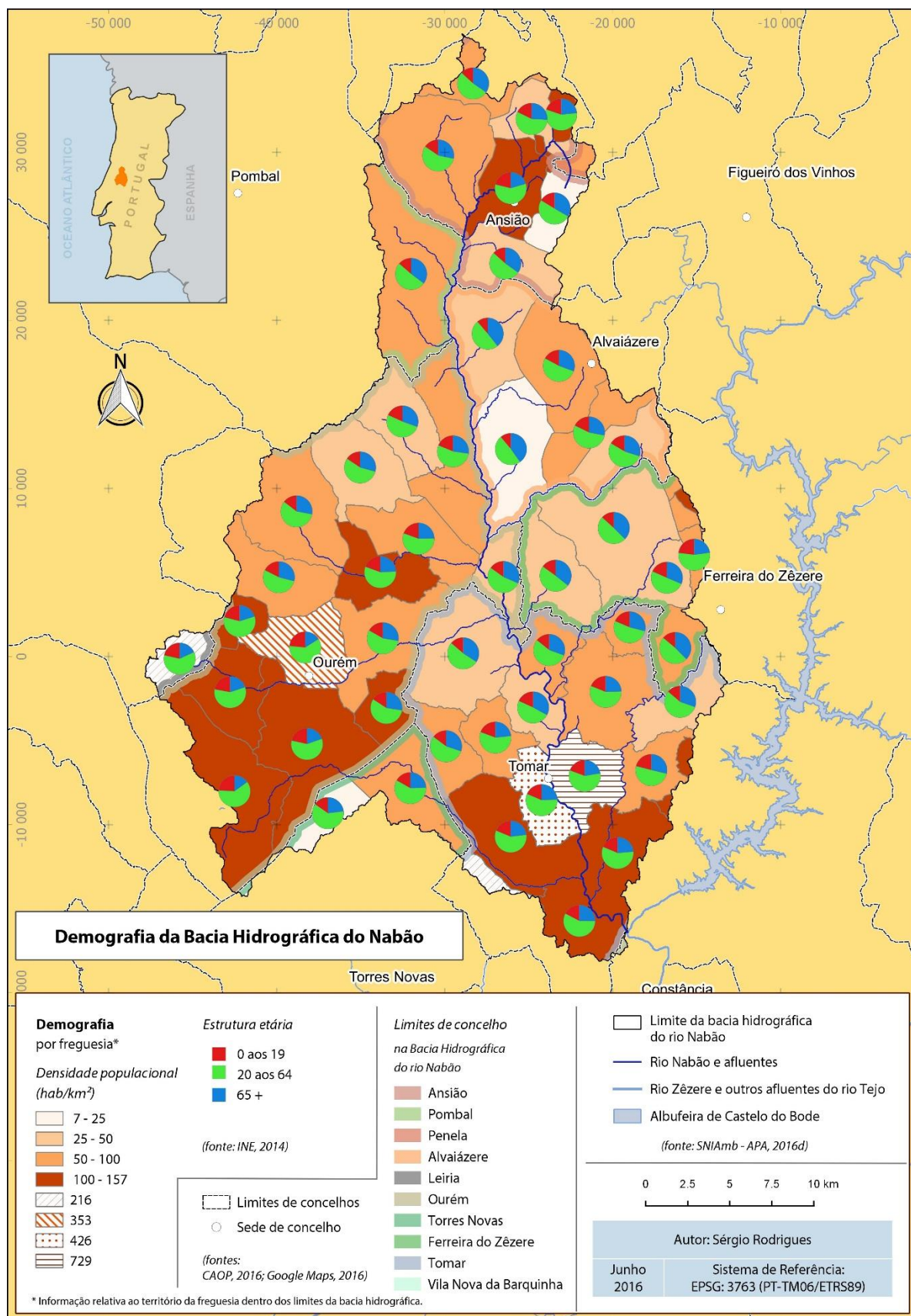


Figura 39. Demografia no território da bacia hidrográfica do rio Nabão. Elaboração própria.

Tabela 23. Histórico de inundações na cidade de Tomar.

Data	Cota a montante do Açude dos Frades	Caudal (m³/s)	Fonte
19 Nov. 1852 ^{a)}	51,6	desconhecido	Visita ao local ^{b)} ; (FBO Consultores, 2003a)
22 Dez. 1909	54,5	desconhecido	Visita ao local ^{c)} ; (FBO Consultores, 2003a)
10 Fev. 1979	50,4	EH Matrena: 473,6	(Corrêa, 2013; FBO Consultores, 2003; SNIRH, 2016)
21 Dez. 1989	desconhecida	EH Agroal: 105,5	(Corrêa, 2013; FBO Consultores, 2003a)
7 Dez. 2000	50,6	EH Matrena: 544,5	(Corrêa, 2013; FBO Consultores, 2003a)
5 Nov. 2006	desconhecida	EH Matrena: 200,6	(Corrêa, 2013)
25 Nov. 2006	desconhecida	EH Agroal: 113,93 EH Matrena: 328,94	(Corrêa, 2013)

a) Considerada cheia com período de retorno de 150 anos (FBO Consultores, 2003a). b) Marca existente na Rua Marquês de Pombal, a este da ponte. c) Marca existente na Rua Serpa Pinto, junto à farmácia Torres Pinheiro. Ver Figura 40.

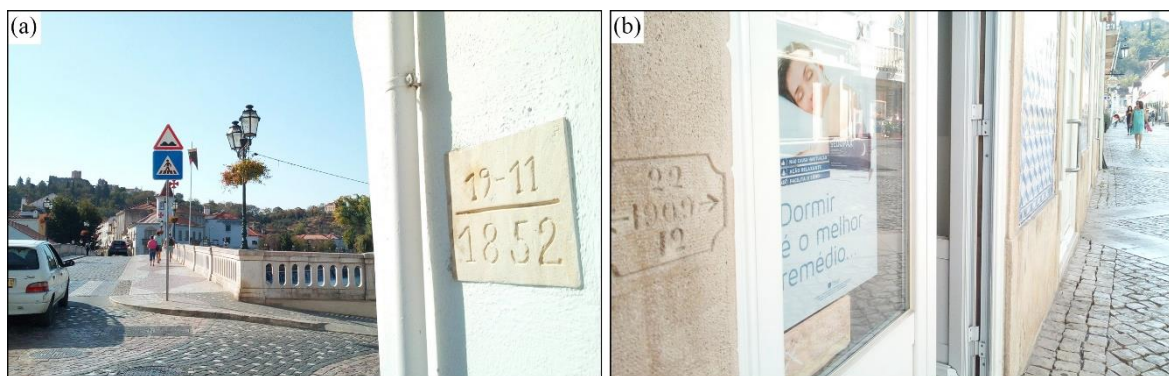


Figura 40. Marcas de níveis históricos de inundação na cidade de Tomar: a) de 1852 na Rua Marquês de Pombal, na margem esquerda do Nabão. b) de 1909 na Rua Serpa Pinto, junto à farmácia Torres Pinheiro, na margem direita do rio. Outubro de 2017. Elaboração própria.



Figura 41. Inundações de 2006 em Tomar. (a) Vista para a Av. Torres Pinheiro a partir do cruzamento desta com a Av. Combatentes da Grande Guerra. (b) Vista para a Levada, a partir da Rua João Carlos Everard. Fonte: Blog Tom@r na Rede⁴.

5. Análise preliminar do risco de inundação na BH do rio Nabão através de análise hierárquica de processos

Enquadrada na caracterização da BH do rio Nabão, efectuou-se uma análise preliminar do risco de inundação, a qual deu origem ao artigo *Preliminary assessment of flood hazard in Nabão river basin using an Analytical Hierarchy Process*, que aguarda publicação (Andrade *et al.*, in press) (Anexo D) e foi apresentado na conferência ICNAAM 2017 - 15th *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics*.

Para realizar o zonamento da bacia de acordo com o risco de inundação, partiu-se de informação georreferenciada de elevação (EL) e declividade (DL) (MDT STRM-JAG), tipo de solo (TS) (carta litológica) e uso e ocupação do solo (UOS) (COS 2010, níveis 1 e 2, ver Anexo B). Com base nestes parâmetros determinou-se um índice de risco de inundação, FHI (*Flood Hazard Index*), obtido através da AHP (Análise Hierárquica de Processos) proposta por Saaty (1980).

A AHP, é uma metodologia de análise multicritério, que permite a avaliação de fenómenos complexos, que dependem de um conjunto de variáveis, cujo impacto individual nos primeiros é particularmente difícil de quantificar. Nesta análise combinatória, a experiência do investigador é relevante sendo, no entanto, complementada com o conhecimento do território, pesquisa bibliográfica e lógica matemática (Saaty, 1980; Vargas e IPMA-B, 2010).

⁴ <http://tomarnarede.blogspot.pt/2016/11/lembra-se-das-cheias-de-ha-10-anos-c.html>

Muito embora este método assente em princípios matemáticos, apresenta um carácter de subjectividade no que à atribuição dos pesos dos parâmetros diz respeito. Depende igualmente da qualidade dos dados (parâmetros) de base. Pese embora estes aspectos, este método de análise permite, ainda assim, aferir sobre a vulnerabilidade, perigosidade ou riscos, dependendo dos parâmetros e caracterização do território que se pretende efectuar (Estoque, 2012; Ouma e Tateishi, 2014; Souza e Kux, 2011; Zahedi, 1986).

Apresenta-se seguidamente uma breve descrição da metodologia utilizada para o cálculo do FHI (10),

$$FHI = \sum_{i=1}^n r_i w_i = w_{EL}EL + w_{DE}DE + w_{UOS}UOS + w_{TS}TS \quad (10)$$

no qual w_i são os pesos de cada parâmetro r_i considerado, remetendo-se para Saaty (1980) e Anexo B para mais informações.

Neste trabalho, a AHP foi implementada em quatro fases: 1) recolha e tratamento da informação de base; 2) passos intermédios para a determinação do FHI; 3) análise de consistência e validação do FHI; 4) fase de obtenção e análise dos resultados. Na primeira fase foi feita uma transformação dos parâmetros (tipo de solo e uso e ocupação do solo) em formato vectorial para formato *raster* com resolução de 25 metros (*Polygon to Raster* – ArcGIS). Seguidamente, cada parâmetro foi avaliado e classificado, numa escala de 1 a 10, (*reclassify* – ArcGIS) de acordo com a sua relevância para o risco de inundação (Tabela 24).

A reclassificação dos quatro parâmetros utilizados no cálculo do FHI (Figura 42), tal como anteriormente referido, seguiu para cada um deles uma divisão por classes efectuada segundo a Tabela 24. Esta reclassificação deu origem às imagens que se observam na Figura 43, EL, DE, TS e UOS, respectivamente, que após validação da matriz de consistência e cálculo dos respectivos pesos, irá permitir obter o mapa de risco associado (Figura 44), tal como a seguir se descreve nas segundas e terceiras fases.

Numa segunda fase, foi definida uma matriz de comparação de pares de parâmetros que, neste estudo, fez uso de uma escala de 1 a 7, bem como dos seus valores recíprocos (

Tabela 25). De notar que a classificação pode ser efectuada de 1 a 10, indicando a importância relativa, desde muito pouco até extremamente relevante, segundo Saaty (1980).

Nesta matriz, comparando o primeiro parâmetro com os demais, este classifica-se como tendo entre a mesma relevância (1) e muito mais relevância (7) do que o segundo. A classificação dos pares inversos varia de acordo com o recíproco dos mesmos valores, 1/7 a 1, indicando entre muito menos relevância e o mesmo nível de relevância do primeiro face ao segundo. Na matriz produzida: a) o primeiro valor é 1 porque o parâmetro está a ser comparado com ele próprio; b) o último valor da primeira coluna, correspondente ao par *TS/EL*, é 7 porque a primeira é considerada *extremamente mais importante* do que a segunda como factor no risco de inundação. O valor 0,143 (1/7), correspondente ao par inverso *EL/TS*. Valores intermédios representam relevâncias intermédias. Deste modo, obteve-se a matriz de comparação que se apresenta na (Tabela 25). Para cada um dos quatro parâmetros foi determinado um peso w_i (Tabela 25) seguindo a metodologia descrita por Saaty (1980) e no Anexo B.

Seguidamente, procede-se à terceira fase na qual foi calculado o IC (índice de consistência) cujo valor 0,041 se encontra abaixo de 0,1 valor que serve de limite (*threshold*) até ao qual se aceita a comparação anteriormente efectuada entre os pares de parâmetros (ver Anexo B). Após esta primeira validação, determinou-se a RC (razão de consistência) 0,046 tendo sido posteriormente obtido o índice FHI de (11)(10):

$$FHI = \sum_{i=1}^n r_i w_i = 0,057EL + 0,122DE + 0,264UOS + 0,558TS \quad (11)$$

a partir do qual todos os parâmetros foram ponderados em ArcGIS e que deu origem ao mapa da Figura 44, na qual se utilizaram as classes de risco constantes da Tabela 26. Esta é, pois, a última fase deste processo.

Os resultados mostram que 61,9% da BH do rio Nabão apresenta um baixo risco de inundação (Figura 44). No entanto, 12,5% do território apresenta um risco moderado, sendo que 15% apresenta um risco alto. De salientar, no entanto, que 2,2% apresenta um risco muito alto para a ocorrência de inundações. Estas áreas são as que se encontram próximas do rio Nabão e seus tributários, tal como é de esperar, encontrando-se nas regiões mais baixas da bacia. Encontram-se, ainda, em zonas povoadas e com grande impermeabilização do solo afectando principalmente a cidade de Tomar (risco alto a muito alto), bem como uma importante área, 17,2%, a este da mesma.

Tabela 24. Classificação de parâmetros segundo a sua relevância no risco de inundação.

Elevação (EL)		Declividade (DE)		Tipo de solo (TS)		Uso e ocupação do solo (UOS)	
classes	relevância	classes	relevância	classes	relevância	Nível 2	relevância
< 70	10	0 – 3	10	Cambissolos	3	1	10
70 – 120	9	3 – 8	9	Litossolos	10	2.1	5
120 – 170	8	8 – 20	5	Luviosolos	2	2.2	2
170 – 220	7	20 – 45	3			2.3	9
220 – 270	6	45 – 75	1			2.4	8
270 – 320	5	> 75	1			3.1	1
320 – 370	4					3.2	1
370 – 420	3					3.3	3
420 – 470	2					5.1	10
> 470	1						

Tabela 25. Matriz de comparação de parâmetros de risco de inundação (AHP).

	Elevação (EL)	Declividade (DE)	Uso oc. do solo (UOS)	Tipo de solo (TS)	Pesos (w_i) ^{a)}
Elevação (EL)	1	0,333	0,2	0,143	0,057
Declividade (DE)	3	1	0,333	0,2	0,122
Uso oc. do solo (UOS)	5	3	1	0,333	0,264
Tipo de solo (TS)	7	5	3	1	0,558
Soma	16	9,333	4,533	1,676	

$$a) w_i = \frac{(EL/soma_{EL} + ED/soma_{ED} + UOS/soma_{UOS} + TS/soma_{TS})}{4}$$

Os resultados mostram ainda a grande relevância do tipo de solo e do uso e ocupação de solo desta bacia para o risco de inundações. O planeamento deficiente do território, a baixa infiltração perto das planícies aluviais e margens do rio nas zonas rurais revelam-

se como áreas vulneráveis a inundações. Esta análise preliminar ao risco de inundação permite enfatizar da importância do estudo na cidade de Tomar, a qual tal como vimos anteriormente, apresenta uma elevada densidade populacional, bem como a necessidade de um melhor planeamento e gestão do território na BH do Nabão.

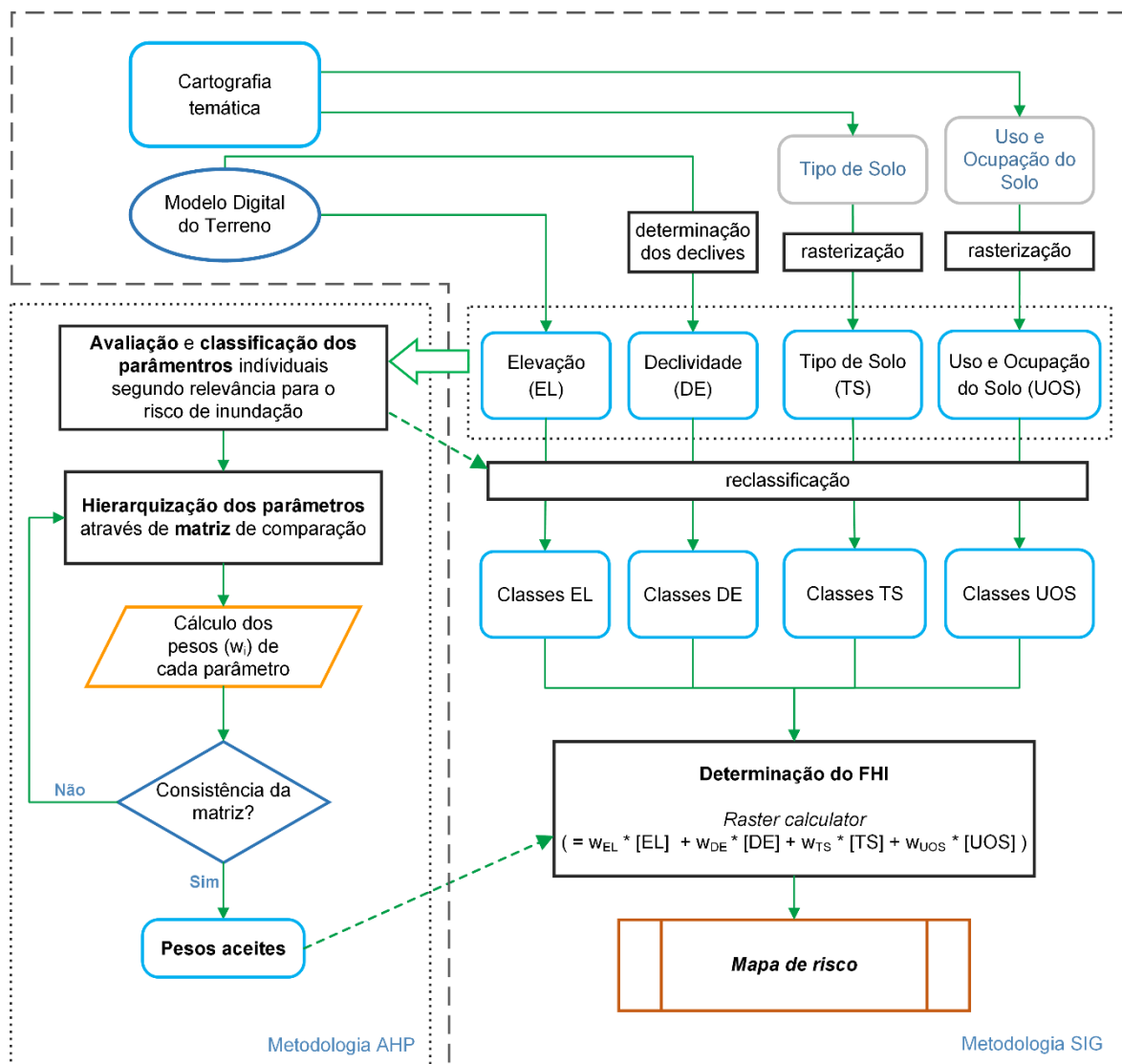


Figura 42. Modelo conceptual utilizado para a determinação do índice de risco através de AHP.

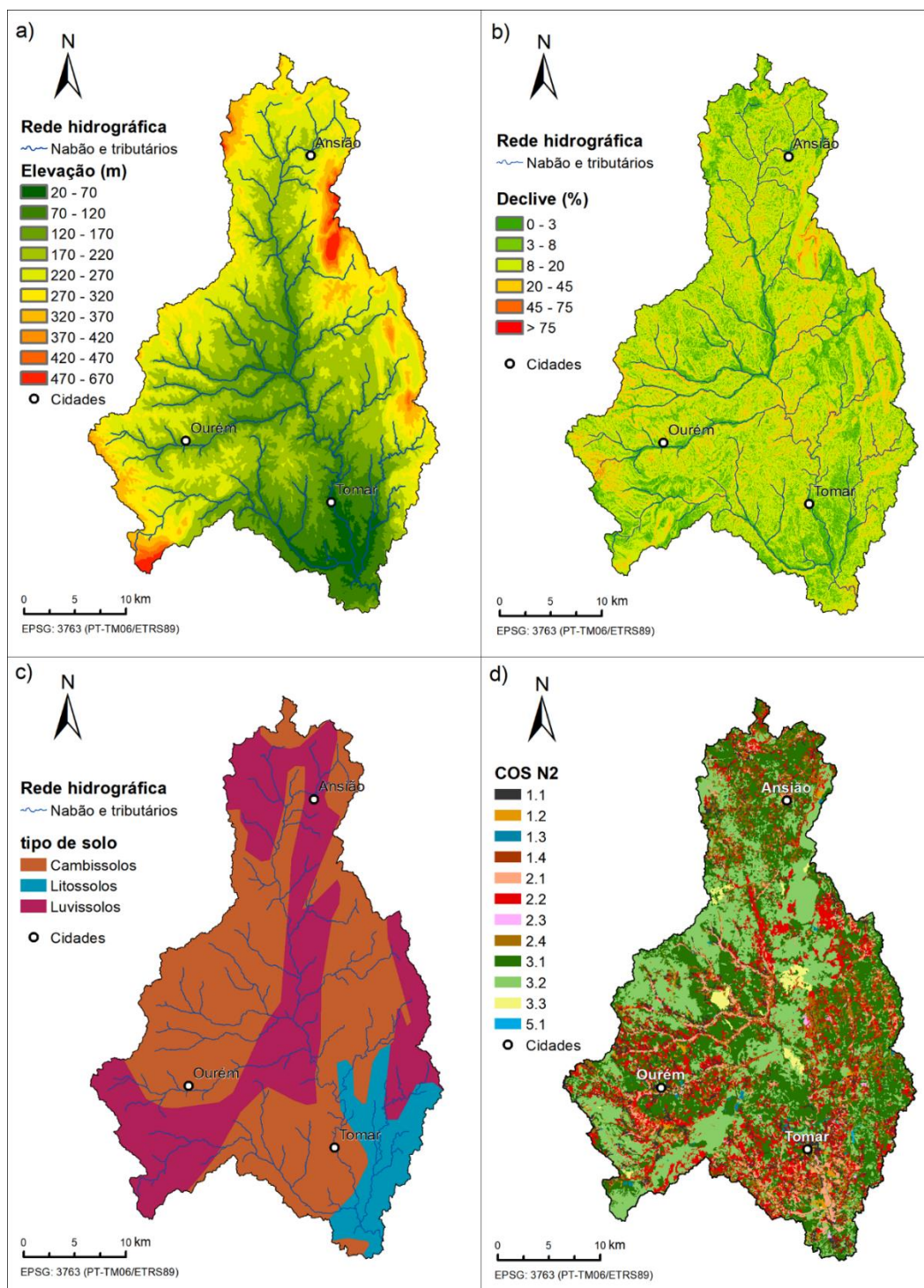


Figura 43. BH do rio Nabão: a) classes de elevação (m), b) classes de declividade (%), c) classes de tipo de solo (ordem) e uso e ocupação do solo (nível 2 da classificação COS 2010, ver Anexo B). Elaboração própria a partir de: MDT STRM J. A. Gonçalves – NASA/JPL; Carta litológica – Atlas do Ambiente; COS 2010, DGTerritório; OSMMap.

Tabela 26. Classes de risco de inundação.

Classes	Risco
1 – 2	Muito baixo
2 – 4	Baixo
4 – 6	Moderado
6 – 8	Alto
8 – 10	Muito alto

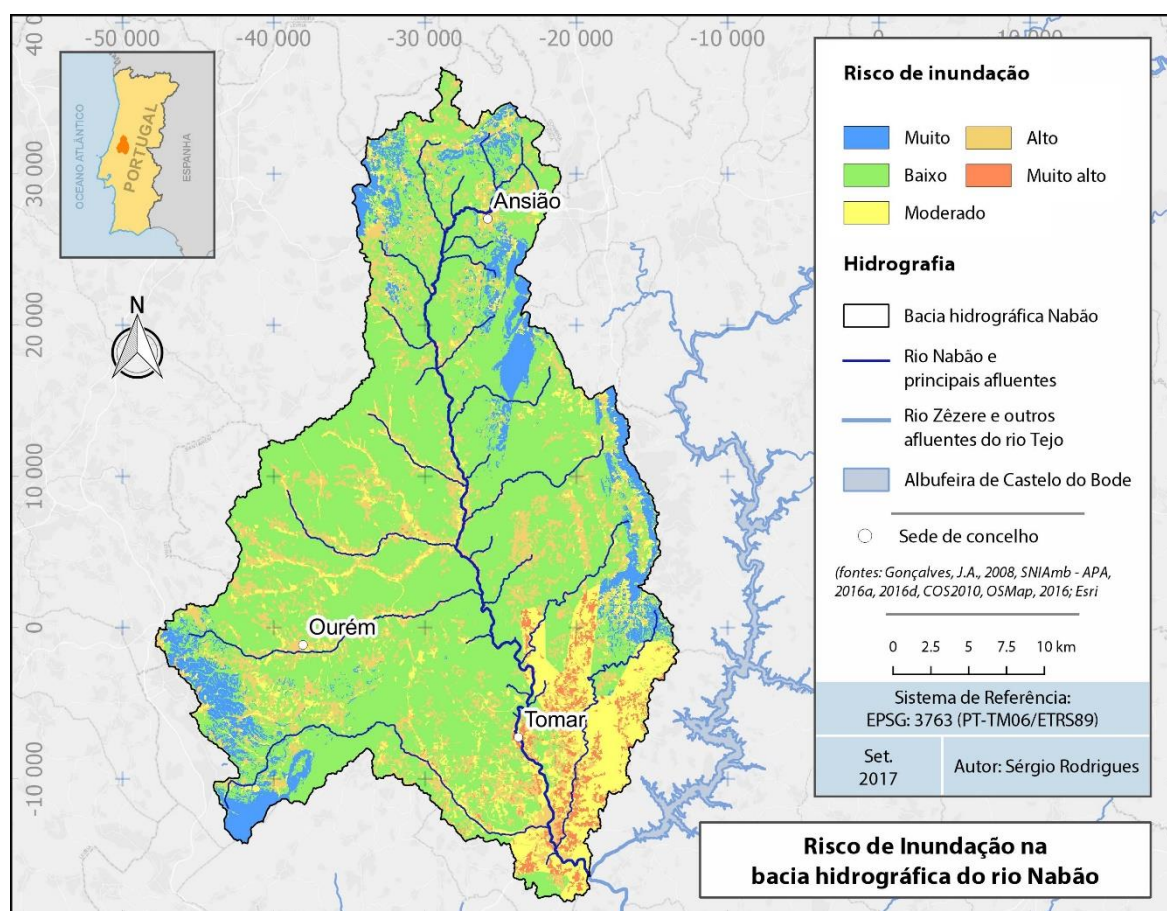


Figura 44. Mapa do risco de inundação para a BH do Nabão. Elaboração própria.

IV. Perigosidade hidrodinâmica de inundação

Neste capítulo iremos utilizar uma metodologia de modelação hidráulica com recurso ao *software* HEC-RAS para a obtenção de uma carta de perigosidade para as inundações num troço seleccionado do rio Nabão dentro da cidade de Tomar. Considera-se esta análise como preliminar, tendo em vista as dificuldades de obtenção de dados (MDT, histórico de precipitação na bacia e dados geométricos do percurso fluvial do rio) que foram encontradas no desenvolvimento deste trabalho e que tornaram difícil a calibração do modelo. Deste modo, ir-se-á somente apresentar a carta de perigosidade a partir de modelação hidráulica em fluxo constante (unidimensional), para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos (probabilidades de ocorrência de 10%, 4%, 2% e 1% respectivamente).

Para a obtenção da carta de perigosidade foi seguida a metodologia descrita no Capítulo III, APA (2016), na produção dos planos de gestão de risco de inundação. No entanto, sendo este um estudo preliminar, logo exploratório relativo a este troço do rio Nabão, considerou-se pertinente comparar os resultados obtidos com uma outra abordagem. Existindo, no entanto, diversas metodologias SIG para a determinação do risco e parâmetros que antecedem o seu cálculo, optou-se por determinar a perigosidade total, seguindo uma abordagem adaptada de van Westen (2004) a qual acresce outro factor diferenciador, a susceptibilidade física. Os resultados obtidos irão ser apresentados e analisados neste capítulo.

1. Área de estudo, dados do modelo e geometria

A área de estudo encontra-se compreendida num troço do rio Nabão, compreendido entre 200 metros a montante da Fábrica de Fiação de Tomar e o Açude de S. Lourenço (Figura 45). Para o modelo foi utilizado um MDT fornecido pela CMT (Câmara Municipal de Tomar), doravante designado por MDT CMT, tendo a geometria sido construída sobre imagens de satélite disponibilizadas pela Esri no *software* ArcGIS, Figura 45, na qual se podem ainda observar os transeptos desenhados. Este MDT, com resolução de 2,5 metros, representa uma área rectangular aproximada de 4 km² (2,5 km, sentido N-S, por 1,6 km no sentido E-O), com a cidade de Tomar localizada nos dois terços norte deste território.

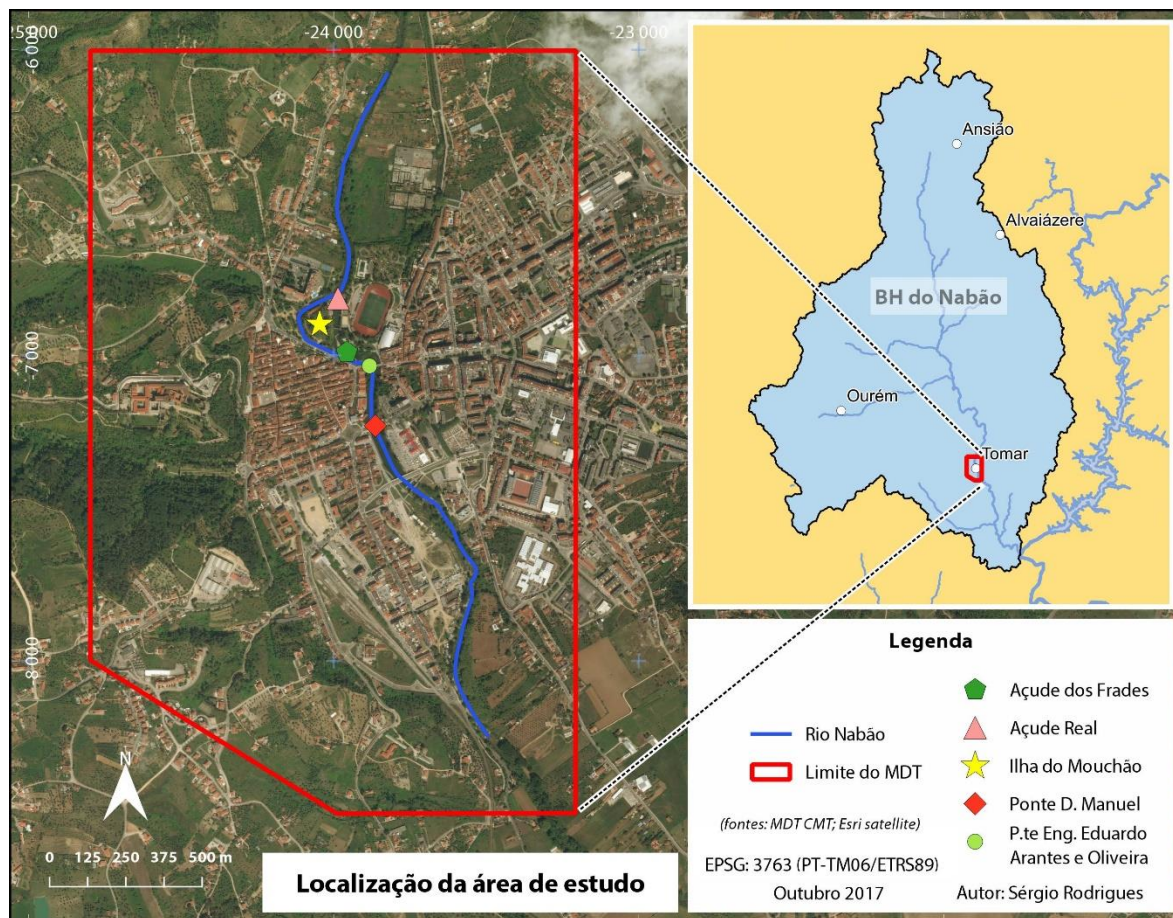


Figura 45. Enquadramento da área de estudo, definida pelos limites do MDT CMT e com o rio Nabão em destaque. Elaboração própria.

Para a caracterização do troço em estudo e seguindo a metodologia descrita na Figura 14, foram inseridos dados relativos à altimetria, comprimento e altura acima do leito. Foram ainda introduzidos valores para os coeficientes de rugosidade de Manning⁵ associados ao código de uso do solo, nível 2, da COS 2010 (Tabela 28 e Tabela B.3), tal como na metodologia AHP. Como condição fronteira de jusante, utilizou-se o valor 0,8%⁶ para o parâmetro *Normal Depth (Downstream)* (FBO Consultores, 2003b).

Os caudais utilizados nas simulações para os diferentes períodos de retorno, tal como a condição de fronteira, tiveram como fonte o Relatório 1, do estudo realizado por FBO Consultores (2003b), no âmbito do programa POLIS na cidade de Tomar. A partir dos dados

⁵ Pretendem introduzir a acção da rugosidade na velocidade da água no modelo.

⁶ Declive de um troço de rio de 400 metros, imediatamente a jusante do troço em estudo.

históricos e de estudos hidrológicos estes técnicos obtiveram uma equação de regressão através do método dos mínimos quadrados que lhes permitiu estimar o caudal, bem como uma curva de vazão para diversos períodos de retorno (Tabela 27).

Tabela 27. Caudais de ponta de cheia adoptados (FBO Consultores, 2003b).

Período de retorno, T (anos)	T = 10	T = 25	T = 50	T = 100
Caudal Q (m³/s)	262	300	351	390

De referir que uma das fases importantes na modelação envolve a definição das condições da geometria do modelo. Neste sentido, ir-se-á efectuar um pequeno resumo dos passos efectuados no HEC-GeoRAS⁷, e que levou à sua definição. De salientar que o HEC-GeoRAS cria, automaticamente, uma base de dados geográfica, que será posteriormente exportada para o HEC-RAS.

A geometria construída, juntamente com algumas considerações na criação desta, são descritas de seguida:

Stream Centerline – Centro geométrico do canal. Linhas utilizadas para estabelecer a rede hidrográfica. Os cursos de água devem ser desenhados de jusante para montante.

Bank Lines – Margens do canal. Linhas que definem o canal normal do curso de água. Separam o canal principal das planícies aluviais. Não necessitam de ser contínuos.

Flow Path Centerlines – Sentidos de escoamento. Linhas que representam o sentido e a distância percorrida pela água no centro de massa do escoamento nas três zonas inundadas: planície aluvial da margem esquerda, canal principal e planície aluvial da margem direita. Devem ser digitalizados no sentido do escoamento. O centro de massa do escoamento do canal principal pode corresponder ao centro geométrico do canal.

XS Cut Lines – Secções transversais. Linhas transversais ao escoamento que funcionam como amostragens das restantes camadas de informação. A elas será associada informação

⁷ Um conjunto de *software*, extensão para ArcMAP, que permite a preparação dos dados geométricos a serem processados em HEC-RAS e o tratamento dos resultados das simulações. Disponível em: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/>

como altimetria, distância entre secções e valores de rugosidade. Devem ser desenhadas de jusante para montante e da margem esquerda para direita, incluindo toda a extensão das planícies aluviais. Devem cruzar perpendicularmente os sentidos de escoamento, fazendo-o apenas uma vez. Não se devem cruzar entre si. Devem ser representadas a uma distância tal que permita uma representação das características hidráulicas da zona considerada.

Bridges/Culverts – Pontes. Semelhantes a *XS Cut Lines*, mas utilizadas especificamente para pontes ou galerias de escoamento.

Ineffective Flow Areas – Áreas com pouco a nenhum escoamento. Polígonos que definem áreas onde o escoamento é pouco eficiente, e.g. antes e depois dos suportes de pontes para definir zonas de contracção e de expansão.

Blocked Obstructions – Obstruções. Polígonos usados para representar zonas onde não existe escoamento, e.g. zonas onde existem grandes construções.

Inline Structures – Açudes, diques. Linhas que representam estruturas transversais que provocam fortes alterações ao escoamento.

Lateral Structures – Estruturas laterais. Definem estruturas laterais, através de linhas, paralelas ao escoamento da água que o encaminham lateralmente.

Qualquer ponte ou outra estrutura que atravessasse o curso de água deve ser antecedida e seguida por uma secção transversal. As estruturas e as secções transversais não se devem cruzar entre si. Apenas *Stream Centerline* e *XS Cut Lines* são obrigatórias.

Seguindo os procedimentos indicados no manual do *software* HEC-GeoRAS (HEC, 2012), foram digitalizados, sobre imagem de satélite Esri, os seguintes elementos geométricos representados aditivamente na Figura 46: (a) *Stream Centerline*, (b) *Bank Lines*, (c) *XS Cut lines*, (d) *Flow path Centerlines*, (e) *Lateral structures*, (f) *Blocked obstructions*.

Seguidamente, os coeficientes de Manning, contidos no tema COS 2010, foram associados às secções transversais (ferramenta *Extract N Values*), sendo ainda necessário associar informação alfanumérica aos vários elementos geométricos. Deste modo, informação sobre cotas, nome do curso de água, distância ao extremo jusante do troço é associada através de ferramentas do HEC-GeoRAS.

Tabela 28. Relação coeficientes de rugosidade de Manning segundo COS 2010 nível 2 (Chow, 1959; Gonçalves, P., 2012).

Código de Uso Solo	Nomenclatura	Valores de Rugosidade de Manning
1.1	Tecido urbano	0.05
1.2	Indústria, comércio e transportes	0.05
1.3	Áreas de extracção de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção	0.05
1.4	Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, e zonas históricas	0.03
2.1	Culturas temporárias	0.035
2.2	Culturas permanentes	0.04
2.3	Pastagens permanentes	0.03
2.4	Áreas agrícolas heterogêneas	0.04
3.1	Florestas	0.06
3.2	Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	0.025
3.3	Zonas descobertas e com pouca vegetação	0.02
N.A.	Canal	0.045

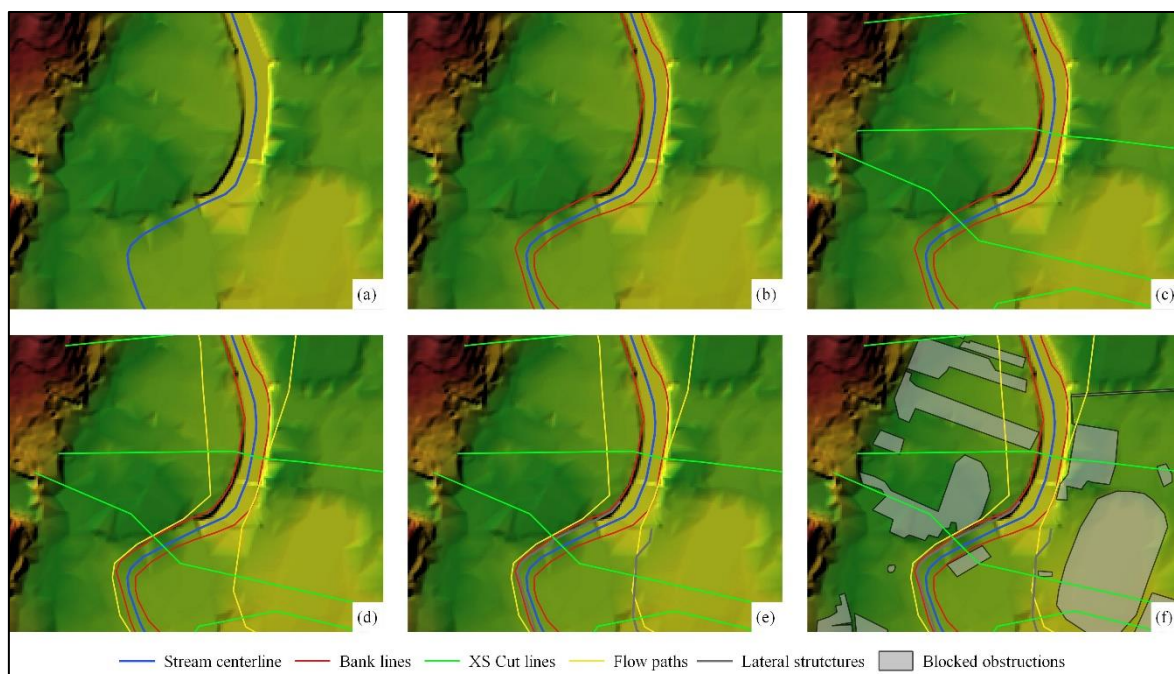


Figura 46. Elementos geométricos da modelação hidráulica. Adicionados consecutivamente: (a) *Stream Centerline*, (b) *Bank Lines*, (c) *XS Cut lines*, (e) *Flow paths centerlines*, (f) *Blocked obstructions*.
Elaboração própria.

A informação relativa aos elementos geométricos criados é apresentada na Tabela 29. O processo de criação dos dados geométricos termina com a sua exportação para um ficheiro, de extensão SDF, que é passível de ser importado pelo *software* HEC-RAS.

Tabela 29. Informação alfanumérica associada aos elementos geométricos (HEC, 2012).

Elemento geométrico	Informação associada
<i>Stream Centerline</i>	- Altimetria, - Comprimento do troço.
<i>XS Cut lines</i>	- Nomes do curso de água ou troço, - N.º de estação (distância ao extremo jusante do curso de água ou troço), - Intercepção com margens, - Distâncias à secção transversal a jusante, - Altimetria.
<i>Lateral structures</i>	- Nomes do curso de água ou troço, - N.º de estação (distância ao extremo jusante do canal ou troço), - Altimetria.
<i>Blocked obstructions</i>	- Atribui a posição das obstruções às secções transversais interceptadas.

2. Processamento

No seguimento da metodologia apresentada na Figura 14, após a criação das diferentes geometrias e exportação dos dados é criado um novo projecto no programa HEC-RAS. A geometria criada é importada e editada através da ferramenta *Geometric Data* (Figura 47). Através do editor gráfico das secções transversais (Figura 48), observou-se que entre a secção 967,088 e a secção 1751,965, o MDT não distingue de forma clara o leito do rio das margens. Assim, tendo por base informação geométrica publicada por FBO Consultores (2003b), definiram-se novas coordenadas para os pontos das secções referidas. Para isto recorreu-se ao editor tabular de secções transversais (Figura 49), onde é possível, entre outros ajustes, alterar os vários pontos (*Station*) que constituem a linha da secção, a sua elevação (*Elevation*) e o valor de Manning (*n Val*) correspondente. Na Figura 48, apresenta-se o perfil da secção transversal 1560,07, depois de atribuídas as cotas do leito do rio, onde se podem ver as margens do rio representadas através de pontos vermelhos. As representações em blocos negros indicam obstruções. Na zona superior do gráfico (Figura 48) visualizam-se os diferentes coeficientes de Manning atribuídos.

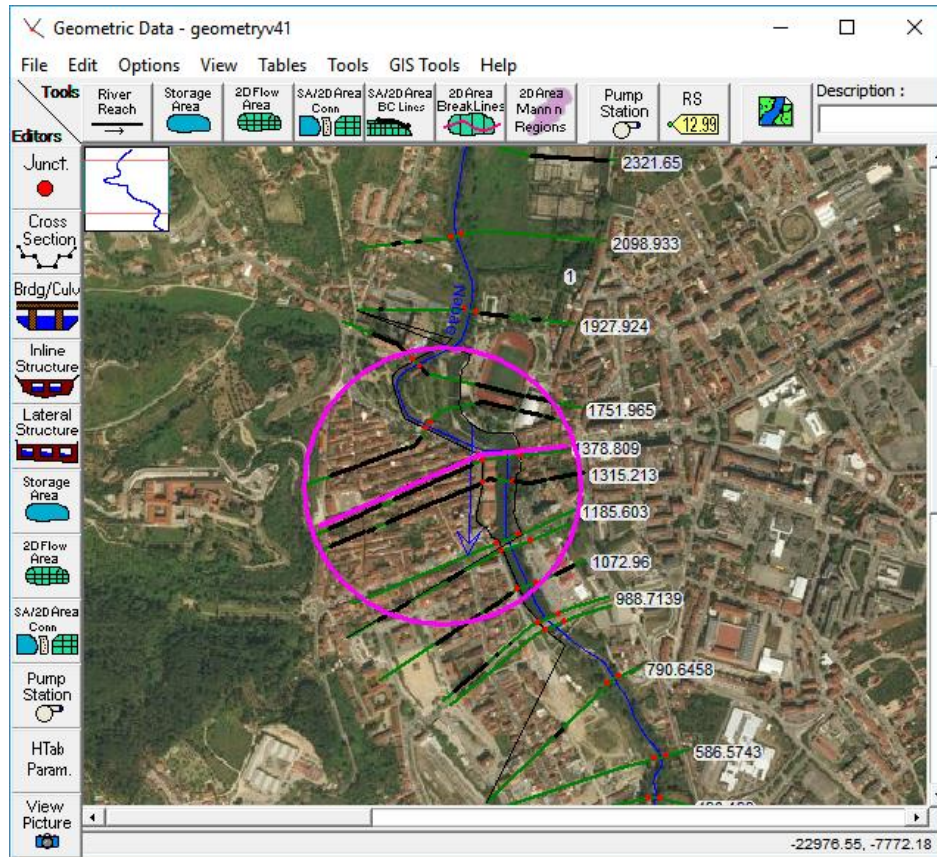


Figura 47. Ferramenta *Geometric Data* do programa HEC-RAS. Elaboração própria.

Após a correcção da geometria é necessário indicar ao HEC-RAS os caudais com que se pretendem realizar as simulações. Por se tratar de uma simulação em fluxo constante, utilizou-se a ferramenta *Steady Flow Data*, onde se podem definir vários perfis de caudais de escoamento (Figura 50). É também através desta ferramenta e da sua opção *Reach Boundary Conditions*, que se define as condições de contorno (0,8% *Normal Depth, Downstream*).

Com os parâmetros do modelo definidos, procedeu-se à execução das simulações, através da ferramenta *Steady Flow Analysis*. No *RAS Mapper*, outra ferramenta incluída no HEC-RAS, é possível visualizar os resultados das simulações (Figura 51). É, no entanto, necessário definir o sistema de coordenadas em que se encontram os dados através da opção *Set Projection for Project*, indicando o ficheiro de extensão PRJ, de qualquer tema de dados que se encontre no mesmo sistema do projecto. É, também, necessário definir o MDT utilizado, o que foi feito através da ferramenta *New Terrain*.

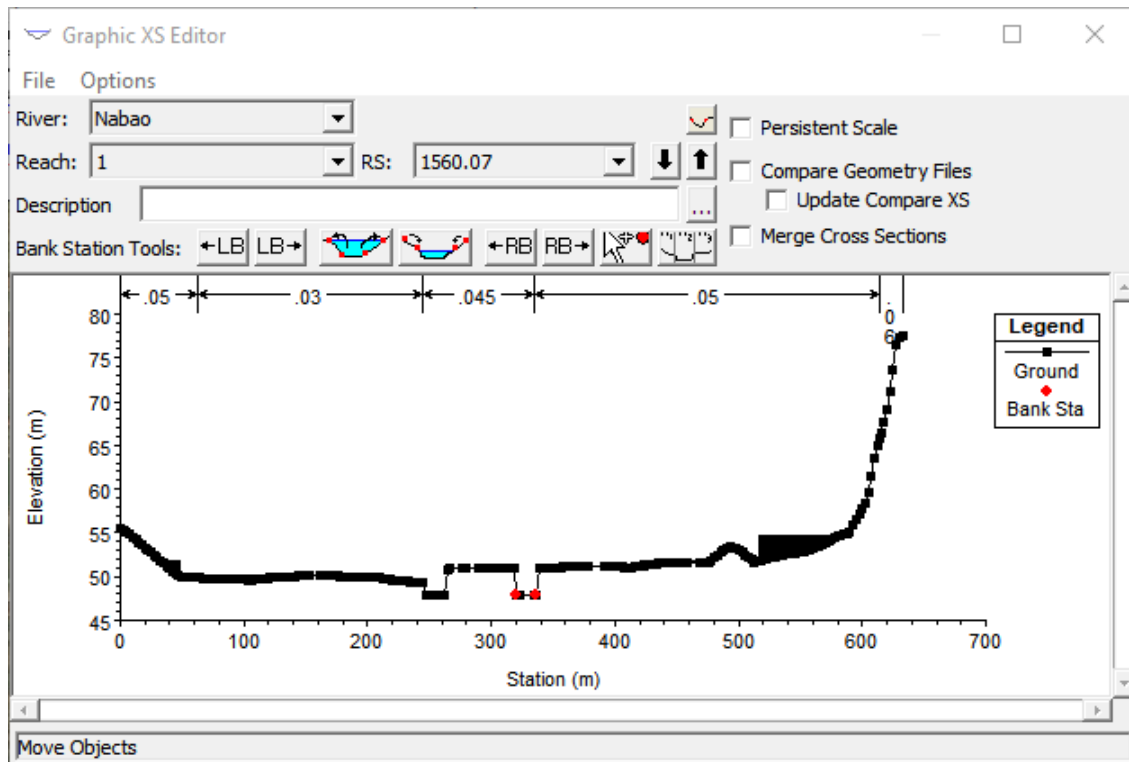


Figura 48. Editor gráfico de secção transversal do software HEC-RAS. Elaboração própria.

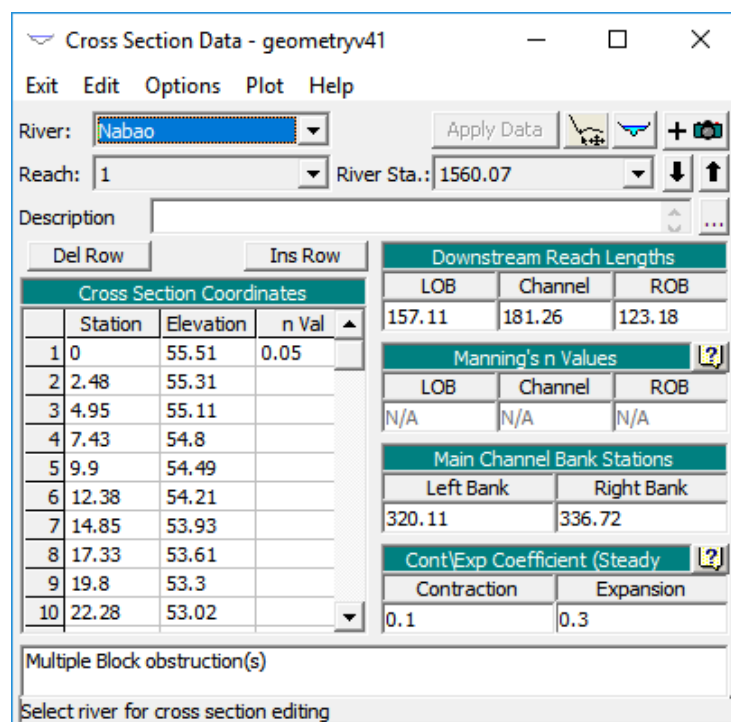


Figura 49. Editor (tabular) de secção transversal. Elaboração própria.

Steady Flow Data - Flow V4

File Options Help

Enter/Edit Number of Profiles (32000 max): Reach Boundary Conditions ... Apply Data

Locations of Flow Data Changes

River: Add Multiple...

Reach: River Sta.: Add A Flow Change Location

Flow Change Location				Profile Names and Flow Rates			
	River	Reach	RS	T 10	T 25	T 50	T 100
1	Nabao	1	2597.094	262	300	351	390

List of optional steady flow parameters set.

Figura 50. Ferramenta de definição de perfis de escoamento do HEC-RAS. Elaboração própria.

Para exportar os mapas de resultados utilizou-se a opção *Manage Results Maps*, onde se podem definir que resultados se querem exportar e onde guardar os mesmos. Foram obtidos mapas de profundidade, velocidade, limite de inundação e elevação da superfície da água para cada um dos períodos de retorno considerados, que irão ser apresentados e analisados na próxima secção.

Antes da obtenção de resultados do modelo hidráulico, a última etapa da metodologia descrita na Figura 14, refere-se à calibração da modelação. Tendo em conta os constrangimentos temporais encontrados no decurso da realização deste estágio, este procedimento não pôde ser aplicado. Assim, a calibração do modelo através do ajuste dos coeficientes de rugosidade de Manning, face a um episódio de inundação com valores de caudais e de níveis de cheia conhecidos não foi realizado. Em trabalhos futuros pretende-se utilizar o episódio de cheia de 1989. Admitindo estes condicionalismos, e o facto de os resultados, para o período de retorno de 10 anos, serem compatíveis com fotografias das cheias de 2006 (Figura 40), cujas cotas não são conhecidas, mas que não estão longe de 30 cm, no caso da Av. Torres Pinheiro (Figura 40.a), e 150 cm na Levada (Figura 40.b), valores obtidos em simulação, assumiram-se os perímetros de cheia encontrados para a aplicação da restante metodologia SIG.

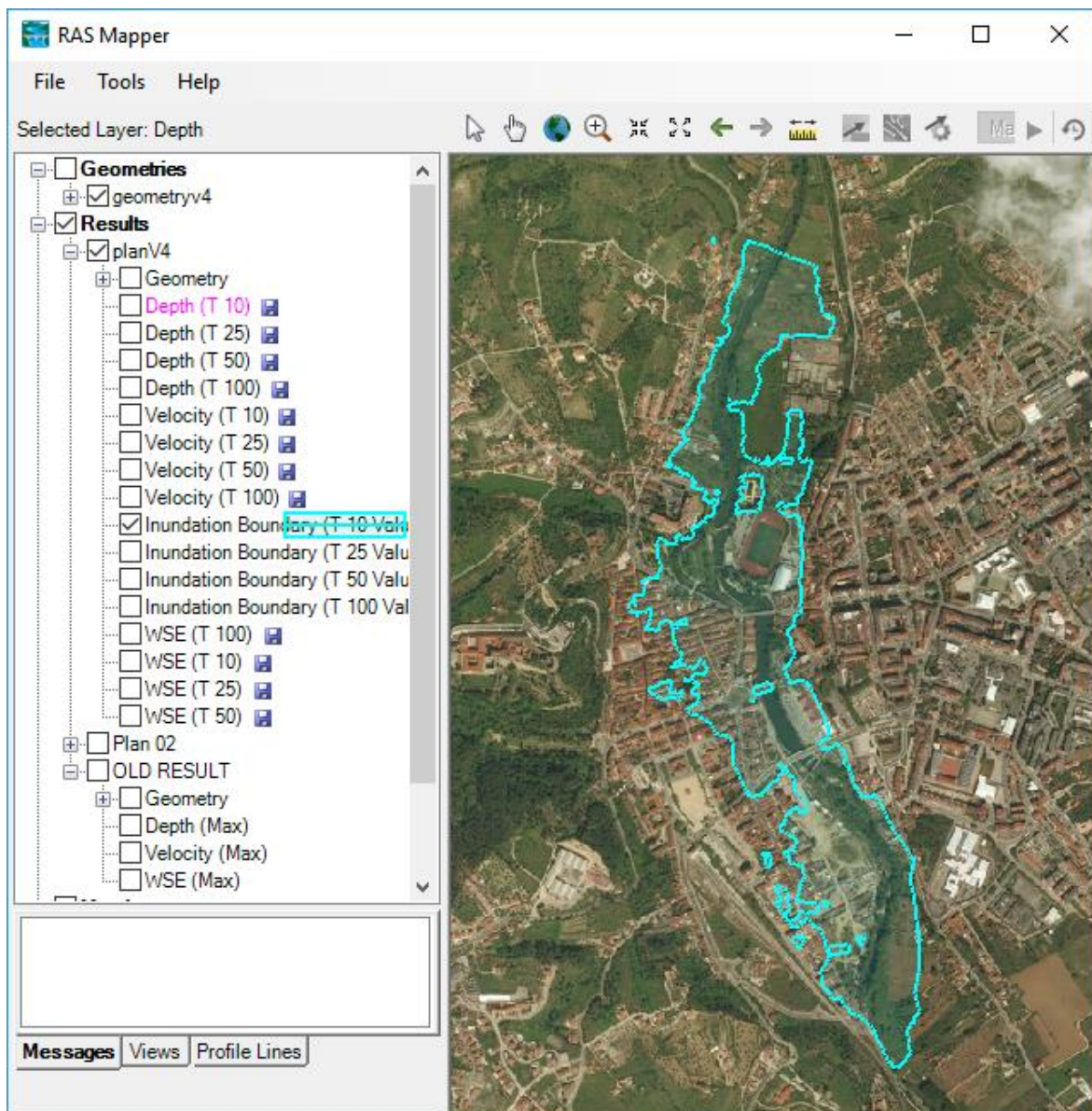


Figura 51. Ferramenta RAS Mapper apresentado o perímetro de inundação para o período de retorno de T10. Elaboração própria.

3. Resultados preliminares e perigosidade hidrodinâmica

A partir do HEC-RAS foram obtidos os mapas para a profundidade e velocidade para os períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos, posteriormente exportados para ArcGIS. Os resultados mostram que as maiores profundidades se encontram sobrepostas, tal como esperado, sobre o leito do rio bem como áreas adjacentes, com especial predominância, na margem esquerda do rio, no seu troço central (área de estudo), Figura 53, sendo visível as

diferentes áreas inundáveis nela presentes na Figura 52. Para cada um dos diferentes períodos de retorno, observam-se distintas linhas de inundação, havendo, portanto, coerência espacial nos resultados obtidos. Mais, por comparação com registos fotográficos e vídeos encontrados na internet as linhas de inundação ao período de retorno de 10 anos, encontram-se dentro do que foi observado para as últimas inundações. Este facto, contribui ainda que de forma empírica, para a validação dos dados obtidos do modelo HEC-RAS. Na área de estudo, as maiores velocidades observam-se junto ao Açude Real, a norte da ilha do Mouchão e na porção final do seu troço (Figura 54). Este facto, irá ter influência directa, nos padrões observados nos mapas de perigosidade hidrodinâmica que se apresentam seguidamente (Figura 55).

Com base nos resultados apresentados anteriormente, relativos à profundidade e velocidade e seguindo a metodologia descrita no capítulo II, ponto 5.2. (APA, 2016) apresenta-se então na Figura 55, o mapa da perigosidade hidrodinâmica para a área de estudo e para os diferentes períodos de retorno. A metodologia de análise espacial utilizada encontra-se no Anexo C, Modelo A1 que, a partir do mapa de profundidades e de velocidades obtidos em simulação, produz e reclassifica o mapa de perigosidade hidrodinâmica em ArcGIS.

A observação da Figura 55, permite concluir que, ao longo do traçado do seu leito, a perigosidade se encontra entre a média e muito alta, sendo baixa a muita baixa a partir das suas margens, com excepção na área compreendida o Açude Real e a ponte Eng.º Eduardo Arantes e Oliveira. Tal como esperado, as áreas associadas à maior perigosidade, são resultados directo da sobreposição das áreas para as quais se observaram maiores valores de profundidade e velocidade. No entanto, é de salientar toda a zona envolvente à ilha de Mouchão e que se estende para o edificado da margem direita do rio. Nesta área, de grande densidade do tecido urbano, a perigosidade é média a alta, aumentando para os diferentes períodos de retorno, tal como esperado (Figura 55).

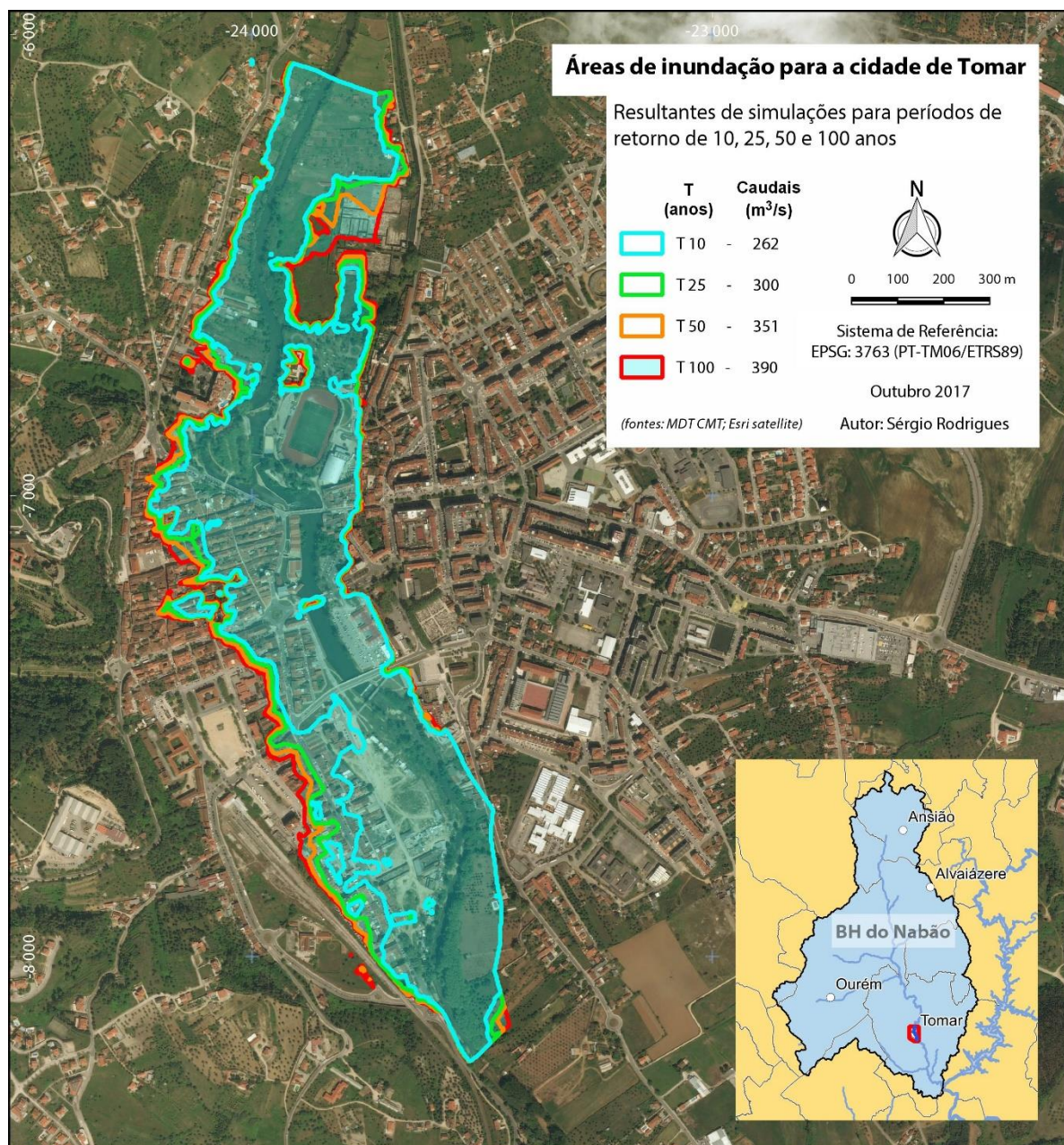


Figura 52. Áreas de inundação para a cidade de Tomar resultantes de simulação para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. Elaboração própria.

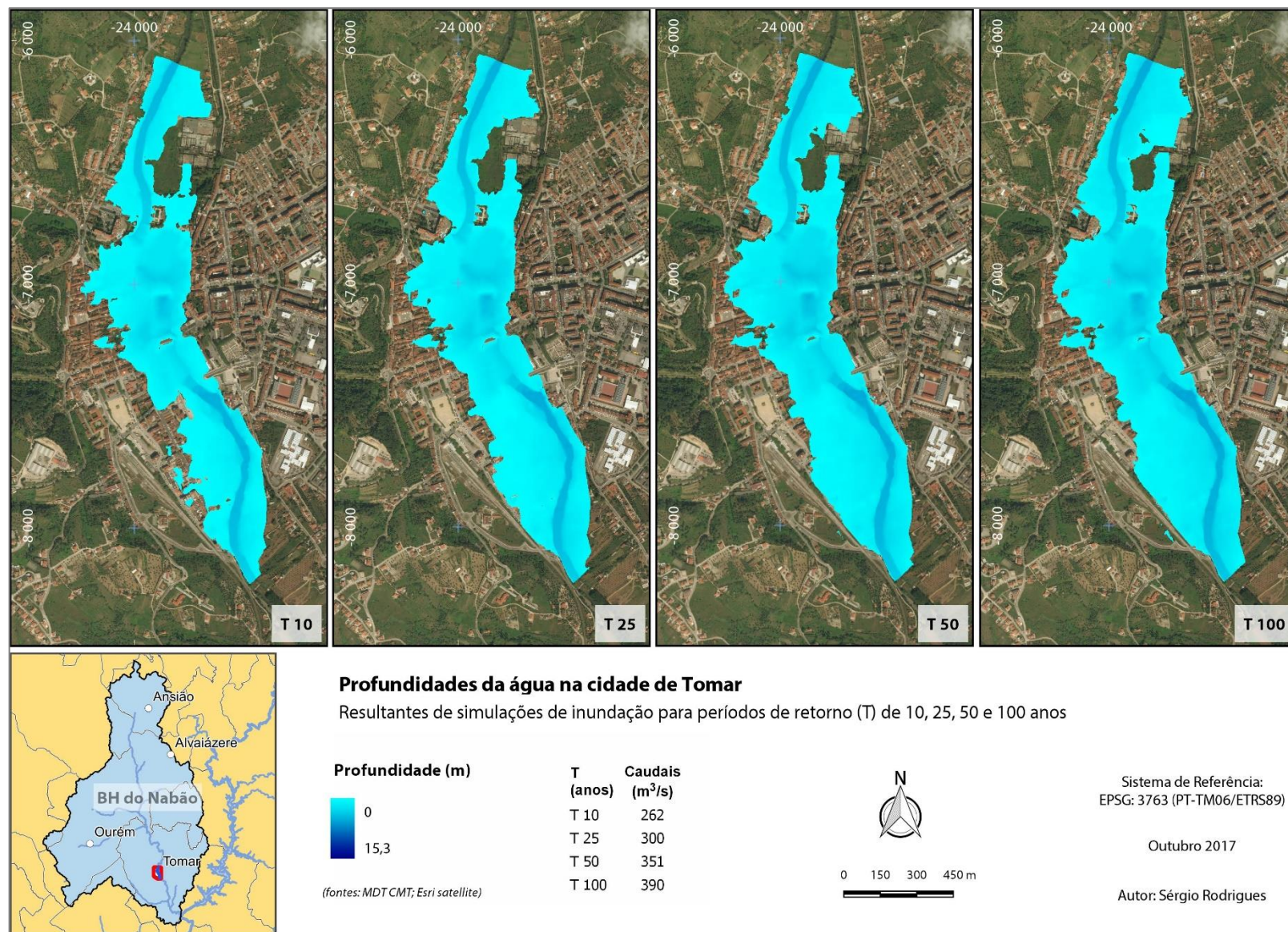


Figura 53. Profundidades da água, na cidade de Tomar, resultantes de simulações de inundações para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos.

Elaboração própria.

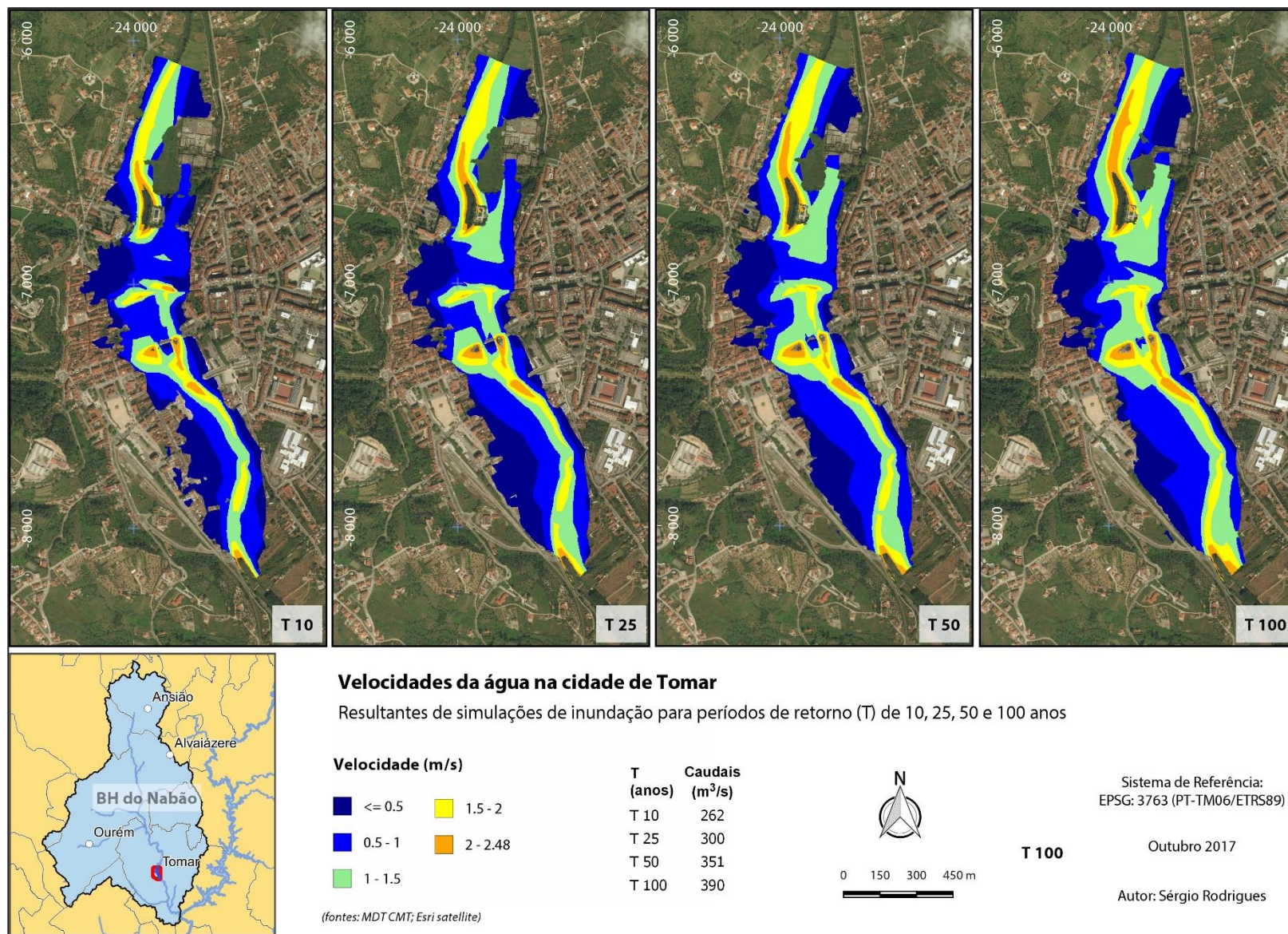


Figura 54. Velocidades da água, na cidade de Tomar, resultantes de simulações de inundações para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos.

Elaboração própria.

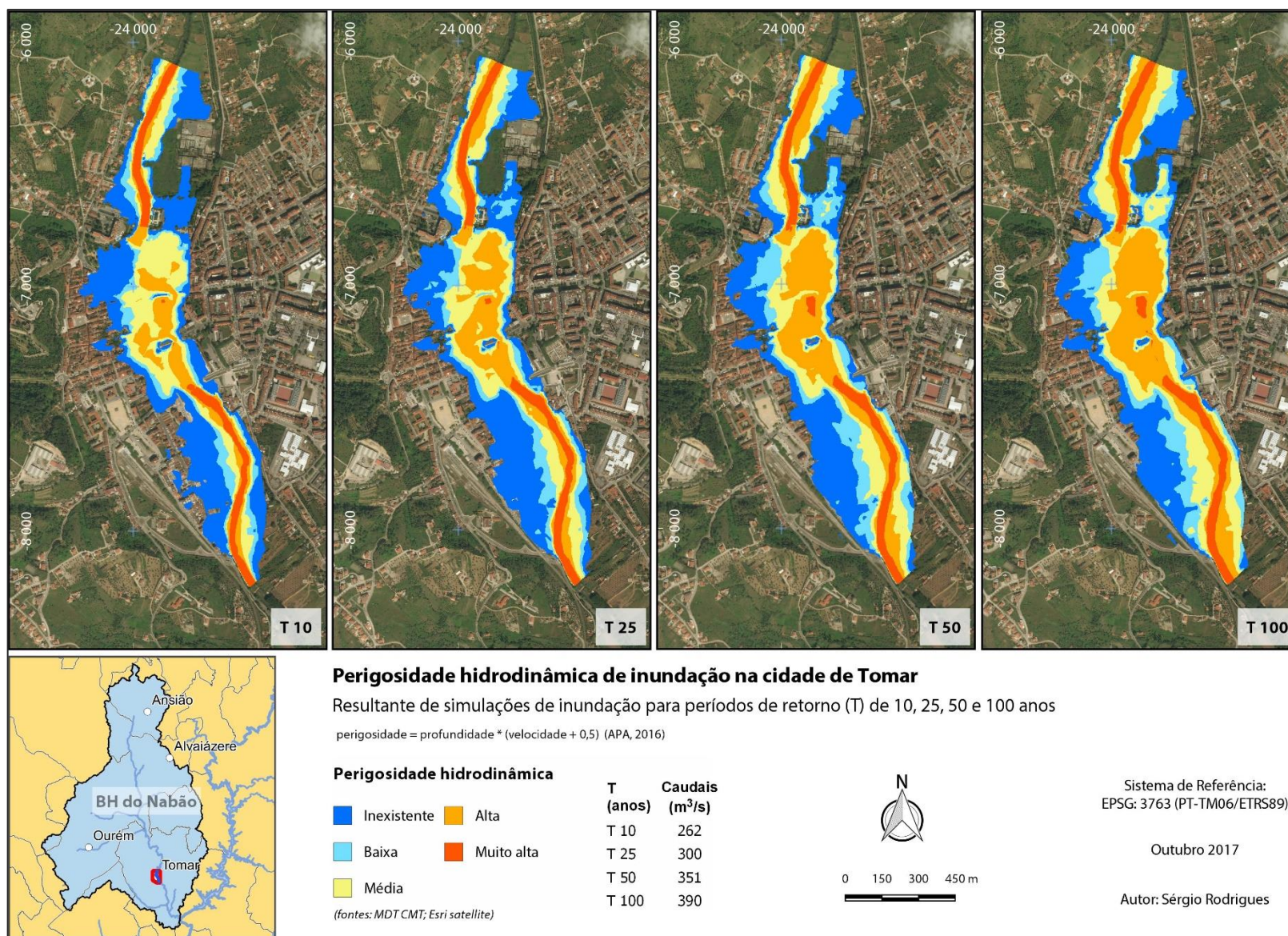


Figura 55. Cartas de perigosidade hidrodinâmica de inundação na cidade de Tomar, resultantes de simulações de inundações para períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. Metodologia APA (2016). Elaboração própria.

4. Comparação de metodologias na determinação da perigosidade

A metodologia descrita no Capítulo III, para a determinação da perigosidade hidrodinâmica, segue as recomendações da APA (2016) cujos resultados foram apresentados no ponto anterior. No entanto, existem diversas metodologias para a determinação deste factor, as quais utilizam procedimentos que, embora semelhantes, têm associados diferentes critérios. Deste modo, neste ponto, pretende-se comparar resultados entre duas abordagens diferentes para a avaliação da perigosidade, procurando-se ainda determinar por intermédio da SL (declividade) e da LIT (litologia) a susceptibilidade física da área de estudo às inundações.

Nesta abordagem, adaptada da ANPC (2009) e van Westen (2004), o risco de inundação, R (risco) é dado por (12):

$$R = P_T \times V = (P \times S) \times V \quad (12)$$

na qual P_T é a perigosidade total, P a perigosidade, S a susceptibilidade física e V a vulnerabilidade social e económica. Neste contexto, a susceptibilidade física corresponde à propensão que o território tem para a ocorrência de inundações, determinada pelos elementos físicos, tais como a permeabilidade e declividade.

A perigosidade é determinada através de (14):

$$P_i = d + v \quad (14)$$

onde d é a profundidade (m) e v a velocidade (m/s). Tal como na metodologia AHP, estes parâmetros são posteriormente reclassificados com base nos dados da Tabela 30.

Para o cálculo da susceptibilidade, seguiu-se (14)

$$S = SL + LIT \quad (14)$$

e utilizaram-se os mapas dos declives e litologia, previamente reclassificados segundo a Tabela 31.

Finalmente, o mapa de perigosidade total foi reclassificado de acordo com a Tabela 32.

Tabela 30. Valores utilizados na reclassificação de parâmetros para a determinação da perigosidade (Belo, 2012).

Profundidade (m)	Velocidade (m/s)	Perigosidade	Código	Classificação
0 – 0,25	0 – 1,5	0 – 2	1	Muito baixa
0,25 – 0,5	1,5 - 3	2 – 4	2	Baixa
0,5 – 1,5	3 – 4,5	4 – 6	3	Moderada
1,5 – 6	4,5 - 6	6 – 8	4	Elevada
>6	> 6	8 - 10	5	Muito elevada

Tabela 31. Valores utilizados na reclassificação dos mapas de declives e litologia (Belo, 2012).

Declividade (%)	Permeabilidade (litologia)^a	Susceptibilidade física	Código	Classificação
0 – 2,5	Areias e cascalheiras	0 – 2	1	Muito baixa
2,5 – 5	Arenitos, conglomerados, calcários dolomíticos, margosas e margas	2 – 4	2	Baixa
5 – 7,5	-	4 – 6	3	Moderada
7,5 – 15	-	6 – 8	4	Elevada
> 15	-	8 - 10	5	Muito elevada

a. Apenas se descrevem os tipos existentes na área de estudo.

A metodologia de análise espacial utilizada encontra-se descrita no Anexo C. Foram utilizados três modelos: Modelo A2 – a partir do mapa de profundidades e de velocidades obtidos em simulação, do qual o mapa de perigosidade é produzido; Modelo B – dado o MDT, produz-se e reclassifica-se (Tabela 31) o mapa de declives e, a partir do tema vectorial de informação litológica, produz-se um *raster* que depois se reclassifica (Tabela 31). Por

último, calcula-se e reclassifica-se a susceptibilidade física de acordo com (14) e com a Tabela 31; o Modelo C – determina os mapas de perigosidade hidrodinâmica e de perigosidade, recorrendo aos Modelos A1 e A2.

Tal como foi referido anteriormente, a susceptibilidade foi obtida por intermédio da declividade e litologia, que define a permeabilidade da área de estudo (Figura 56, imagem da esquerda) que é independente dos diferentes períodos de retorno. Os resultados mostram a zona urbana, na margem direita do rio, como sendo uma zona de alta susceptibilidade às inundações. Sendo que nela se infere a influência directa da declividade, zona inferior a 8% altamente impermeabilizada. As áreas adjacentes às margens apresentam maioritariamente uma susceptibilidade média.

A análise do mapa da perigosidade para o período de retorno de 10 anos (não se apresentam os dos restantes períodos), ainda sem o factor susceptibilidade, permite concluir que o troço do rio e zonas adjacentes apresentam uma perigosidade média (Figura 56, imagem ao centro). Observam-se ainda duas pequenas zonas com perigosidade alta, facto que advém das maiores velocidades atingidas nessa zona do rio.

A partir do mapa de perigosidade simples e do mapa de susceptibilidade produz-se o mapa de perigosidade total seguindo (12), que finalmente se reclassifica, segundo a Tabela 32, para cada um dos períodos de retorno (Figura 57). Este modelo permite que, numa interface, se forneçam todos os parâmetros de entrada para o cálculo da perigosidade, o que possibilita a célere repetição da utilização do modelo, e.g. utilização para várias modelações.

Os resultados permitem determinar que praticamente toda a zona envolvente ao rio, associada à zona de estudo, se classifica com perigosidade (total) média, sendo o seu impacto na zona urbana maior, à medida que o período de retorno aumenta, como seria de esperar. No troço que se encontra dentro e nas imediações da ilha do Mouchão, tal como já tinha sido observado nos mapas da perigosidade hidrodinâmica (Figura 55), a perigosidade aumenta classificando-se como alta. Quando comparamos os mapas obtidos pelas duas metodologias (Figura 55 e Figura 57) nos diferentes períodos de retorno, ressalta a particularidade de as áreas que agora são classificadas como de perigosidade média são maiores (Figura 57). Este facto, tem ligação directa à utilização no cálculo da perigosidade total do parâmetro susceptibilidade física (Figura 56, imagem da esquerda). Observa-se que toda a margem

direita do rio, dentro do tecido urbano, apresenta uma susceptibilidade alta que agora se traduz directamente no aumento da perigosidade (total).

Tabela 32. Classes de reclassificação da perigosidade de inundação.

Perigosidade total	Código	Classificação
0 – 1	1	Muito baixa
1 – 4	2	Baixa
4 – 9	3	Moderada
9 – 16	4	Elevada
16 - 25	5	Muito elevada

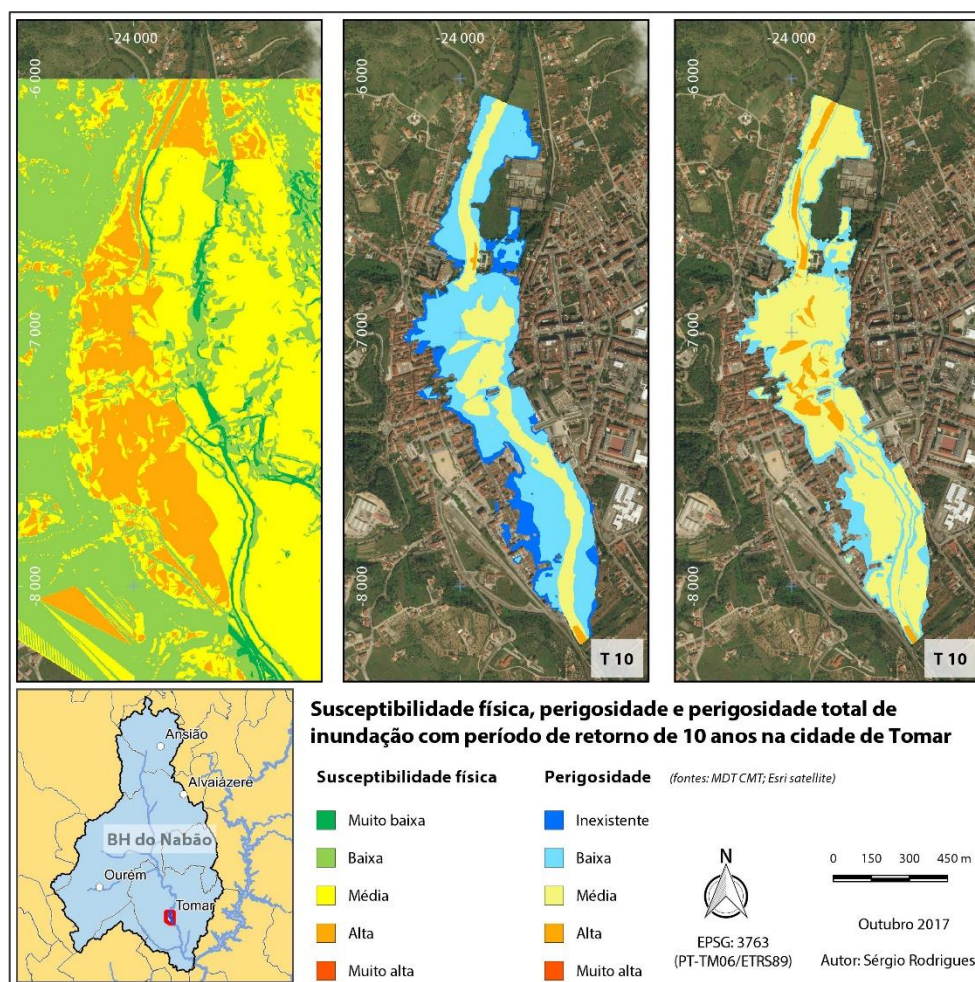
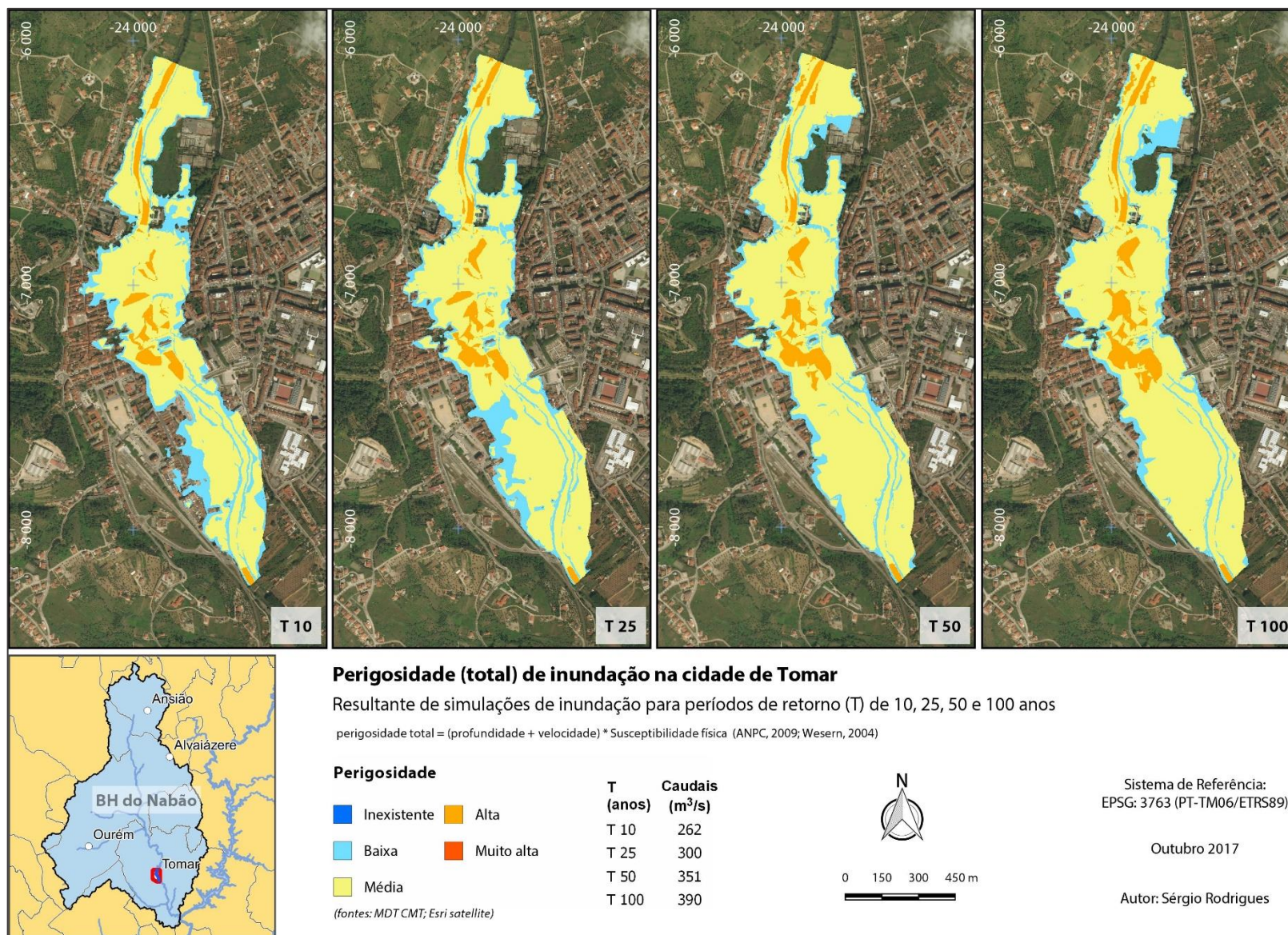


Figura 56. Mapas de susceptibilidade física, perigosidade e perigosidade total para a simulação de inundação com um período de retorno de 10 anos, na cidade de Tomar. Elaboração própria.



Considerando a área inundada para cada período de retorno (Tabela 33 e Figura 58) verifica-se um aumento, esperado, da área total exposta ao perigo de inundação – T 100, T 50, T 25, e T10, que mostram um acréscimo de 13,8%, 5,9% e 5,2% face ao período imediatamente anterior, respectivamente.

A perigosidade hidrodinâmica, que resulta das cartas de profundidade e de velocidade (9), apresenta a maior área na sua classe mais baixa, para todos os períodos de retorno (Tabela 33). Esta área diminui com o aumento do período de retorno, aumentando as classes média e média alta. A classe mais alta é a que apresenta menor área e mantém-se constante com o aumento do período de retorno.

A perigosidade total (14), que inclui a susceptibilidade física na sua determinação, define-se, quase exclusivamente, nas suas classes centrais, classes baixa, média e alta, apresentando uma forte dominância da classe média (maior que 69% para todos os períodos de retorno) (Tabela 33). De salientar que, em ambas as cartas (Figura 55 e Figura 56), e para o período de retorno de 10 anos, a zona compreendida entre a ponte de D. Manuel e a ponte Eng.º Eduardo Arantes e Oliveira, apresentam uma perigosidade alta. Muito embora as metodologias sejam diferentes, os resultados obtidos são concordantes e mesmo complementares para a área em análise.

Tabela 33. Áreas das classes de perigosidade por períodos de retorno. Elaboração própria.

Período de retorno	Tipo de perigosidade	Classe de perigosidade					Área total (m ²)
		Inexistente (%)	Baixa (%)	Média (%)	Alta (%)	Muito alta (%)	
T 10	P. hidrológica	42.9	12.4	22.3	13.4	8.9	541 744
	P. total	0.0	23.6	69.2	7.1	0.0	
T 25	P. hidrológica	37.7	14.2	20.5	19.0	8.6	616 575
	P. total	0.1	19.8	72.3	7.8	0.0	
T 50	P. hidrológica	30.9	17.1	20.6	22.5	8.9	652 900
	P. total	0.1	14.7	76.7	8.5	0.0	
T 100	P. hidrológica	27.4	15.8	22.5	25.4	8.9	686 756
	P. total	0.1	14.5	75.9	9.5	0.0	

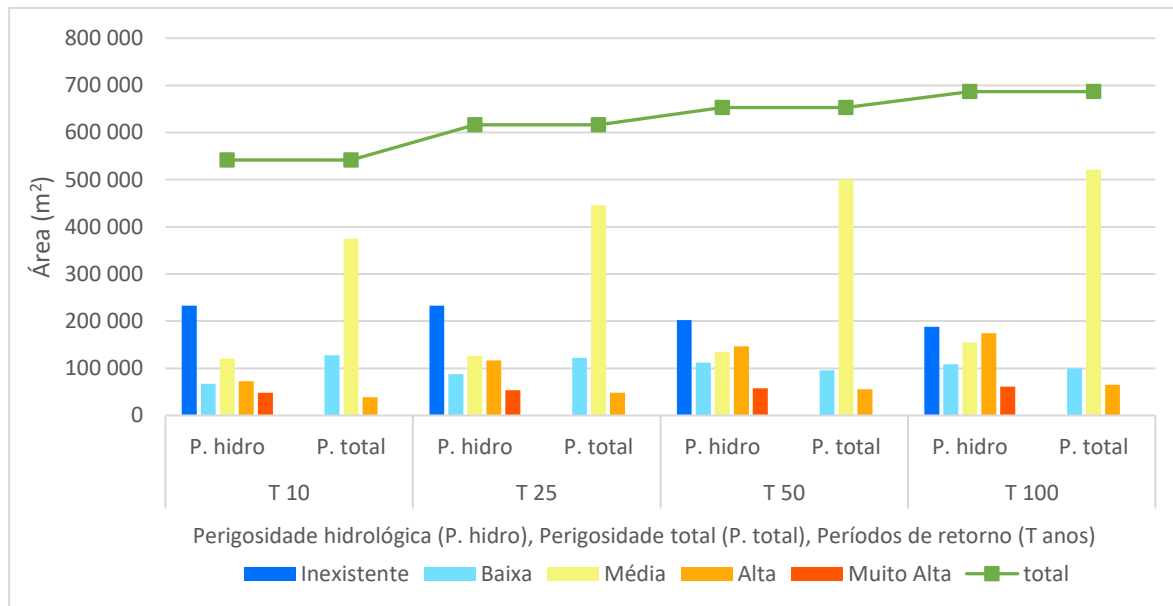


Figura 58. Gráfico comparativo das áreas de inundação por classes de perigosidade. Elaboração própria.

V. Discussão e conclusões

Actualmente os SIG são uma ferramenta essencial para se determinar o risco de inundação. Independentemente do modelo utilizado para estimar o risco ou para calcular algum dos seus componentes, o recurso aos SIG é uma necessidade. Na modelação hidráulica, todos os dados utilizados, sejam eles dados geométricos dos canais de escoamento, MDT, caudais, coeficientes de rugosidade ou dados históricos, todos eles são dados georreferenciáveis, portanto, características intrínsecas de um território. O processamento matemático aplicado a estes dados é feito sob a forma de algoritmos geoespaciais. O resultado da modelação traduz-se em representações espaciais do risco e dos seus factores. Embora seja teoricamente possível realizar todo o processo através de métodos manuais ou semiautomáticos, a sofisticação dos algoritmos e a quantidade de dados e de cálculos envolvidos, tornam esta tarefa praticamente impossível para os níveis de precisão e de celeridade necessários actualmente. Como tal, os SIG, definidos pela sua capacidade de gerir e realizar análise sobre informação espacial, são a ferramenta apropriada para processar informação, e em concreto, para a análise no risco de inundação.

As capacidades que os SIG possuem para a gestão e integração de informação geográfica, na qual se destaca ainda a fácil partilha de dados e célere processamento, tem levado à

proliferação do seu uso como ferramenta de apoio à decisão, considerada imprescindível no planeamento e gestão do território (Gonçalves, P., 2012; Fernandez cit. por Gutierrez, 2008; Meyer *et al.*, 2009) .

Os SIG são vistos como uma das tecnologias actuais mais poderosas em hidrologia, permitindo a recolha e análise de dados. Constituem ainda uma plataforma para integrar dados espaciais que permitem a modelação e a monitorização de inundações (Merkuryeva *et al.*, 2014).

A produção de cartografia de risco, que os SIG possibilitam e optimizam, é de grande importância para a protecção civil: quer, como ferramenta de trabalho para estes profissionais que operam num território, quer para todos os cidadãos, como agentes de protecção civil que são, actuando como ferramenta para promover a sensibilização em matéria de autoprotecção (ANPC, 2014; Julião *et al.*, 2009).

Com o presente trabalho pretendeu-se fazer uma análise exploratória ao risco de cheias num troço do rio Nabão dentro da cidade de Tomar. Procurou-se, por um lado, fazer uma análise macro ao risco de inundação em toda a bacia, tendo por base a análise AHP; e por outro, calibrar um modelo hidráulico 1D por intermédio do HEC-RAS para efectuar uma análise micro. Os SIG foram, neste contexto, a ferramenta de trabalho que permitiu efectuar ambas as análises e fazer a ponte entre estas duas abordagens que teve ainda como interlocutor o ArcMAP e o QGIS. Deste modo, obteve-se a carta de risco de inundação para a BH do Nabão e as cartas de perigosidade dentro da cidade de Tomar, para a que se considerou, como a área de estudo.

A análise AHP aqui apresentada é igualmente uma análise preliminar, que permitiu o cálculo do FHI através de quatro parâmetros: EL, DE, UOS e TS. De futuro prevê-se que a obtenção do FHI seja melhorada com a inclusão de novos parâmetros, para que melhor se possa aferir o risco de inundação em toda a bacia. No entanto, os resultados, mesmo com quatro parâmetros, revelaram um risco muito alto em 2,2 % da bacia, sendo alto em 15%. Grande parte deste território (risco alto e muito alto) encontra-se nas regiões mais baixas da bacia e zonas povoadas com grande impermeabilização do solo. Deste modo, os resultados permitiram apurar que para a cidade de Tomar, o risco é alto a muito alto. Esta análise macro

possibilitou ainda, concluir, sobre a relevância do planeamento e ordenamento da bacia, bem como para a importância da limpeza das margens do rio ao longo do seu trajecto.

Tal como referido anteriormente, pretende-se, no futuro, incluir outros parâmetros nesta metodologia, tais como precipitação, coberto vegetal, densidade da rede de drenagem, entre outros. A inclusão de parâmetros referentes à densidade populacional, distância às estradas de acesso e áreas urbanas, infra-estruturas públicas irão possibilitar a avaliação da componente socioeconómica. Mais, os dados de precipitação de modelos para o futuro (2041-2070), poderão ainda permitir a utilização desta metodologia multicritério para a obtenção de cartas de risco para cenários futuros. Consequentemente, poderão ser uma ferramenta de gestão territorial valiosa para a implementação de medidas de adaptação às alterações climáticas na BH do Nabão.

Para além da caracterização e análise (macro) da BH, efectuou-se um estudo micro ao nível de um troço do rio Nabão. Para tal, utilizou-se um modelo hidráulico construído e implementado através do HEC-GeoRAS e do HEC-RAS. Este modelo permitiu a obtenção dos campos associados à profundidade e velocidade, a partir dos quais se determinou as perigosidades hidrodinâmica e total com recurso a uma reclassificação efectuada em ArcGIS. Os resultados permitiram concluir que grande parte da cidade de Tomar (área de estudo) apresenta perigosidade moderada a alta. Nomeadamente, as zonas mais afectadas incluem, para todos os períodos de retorno a margem direita do rio no qual se encontra grande parte do comércio tradicional, habitações e alguns serviços públicos. Este facto leva a que em trabalhos futuros, tal como para a metodologia AHP, se incluam outros parâmetros de carácter socioeconómico tais como, a densidade populacional, a identificação de locais com serviços públicos relevantes (polícia, bombeiros, camaras municipais, etc.), entre outros. Esta análise, que se encontra associada à caracterização da vulnerabilidade do território, permitirá efectuar a caracterização do risco, tal como referido na revisão bibliográfica efectuada no capítulo II.

Devido a constrangimentos vários, não foi possível realizar todos os procedimentos necessários para uma modelação com uma maior precisão a 1D e 2D. No entanto, o objectivo de explorar metodologias SIG para avaliar a perigosidade associada ao risco de inundação foi alcançado. Para o caso de estudo apresentado, os procedimentos realizados poderão ser aplicados a conjuntos de dados mais completos. As metodologias de modelação,

nomeadamente, a calibração do modelo e a inclusão de outros parâmetros, poderão ser melhoradas e implementadas. De facto, os métodos utilizados são replicáveis e aplicáveis a outros casos de estudo.

No âmbito deste trabalho, não foi possível utilizar um MDT de maior precisão, principalmente dentro da cidade de Tomar. A qualidade do MDT é um factor determinante quer ao nível da resolução quer da precisão, sendo ainda determinante para a fiabilidade dos resultados, uma vez que este influencia directamente o caudal de ponta de cheia e a extensão da inundação (Fernandez *et al.*, 2013; HEC, 2012; Horritt e Bates, 2002). Pese embora este facto, os resultados obtidos apresentam coerência espacial com os registos fotográficos observados. No entanto, em futuros trabalhos, pretende-se colmatar esta deficiência. Considera-se que também seria importante, para a modelação, representar outros elementos geométricos, nomeadamente o açude dos Frades e o açude Real, através de elementos do tipo *Inline Structure*, e as pontes existentes em Tomar (*Bridge*), bem como as zonas de escoamento pouco eficiente (*Ineffective Flow Areas*).

Salienta-se uma vez mais, que este pretende ser um trabalho exploratório no estudo das inundações promovidas pelo rio Nabão e que afectam directamente a cidade de Tomar. A avaliação dos dados existentes, bem como da sua qualidade é um dos passos considerados relevantes para melhorar, em trabalhos futuros, a qualidade dos resultados. Considera-se ainda, que as diferentes metodologias apresentadas na abordagem a este problema, abrem caminho à introdução de parâmetros que melhor se adaptem e que ajudem a afinar e calibrar todos os passos deste processo. A avaliação das zonas actuais e que são consideradas como zonas de potencial risco permitiu, igualmente, avaliar a necessidade da inclusão da análise económico-social desta região. A determinação das zonas com maior risco, associado ao cálculo dos potenciais valores a nível dos estragos causados, poderão igualmente ser uma mais valia para um futuro planeamento do PDM alicerçado em critérios científicos. A gestão dos riscos de inundação associada ao ordenamento e planeamento do território, tendo por base o conhecimento de ocorrências no passado, para prever o futuro é força motriz para o desenvolvimento da investigação nesta área.

Referências bibliográficas

ABREU, B. - Pressão do ar instável causou cheias. **Diário de Notícias**. [Em linha] (26 fev. 2010). [Consult. 26 mai. 2017]. Disponível na internet:

<URL:<http://www.dn.pt/portugal/madeira/interior/amp/pressao-do-ar-instavel-causou-cheias--1505286.html>>.

ALMEIDA, A. B. D. - Prevenção contra inundações naturais na união europeia. Conceitos-chave no contexto de uma gestão do risco. **REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina**. ISSN 2359-1919. 4:1 (2007) 53–62.

AMARAL, L.; VARAJÃO, J. **Planeamento de Sistemas de Informação**. 4ª ed ed. [S.l.]: FCA - Editora de Informática, 2007. ISBN 978-972-722-579-8.

ANDRADE, C.; RODRIGUES, S.; CORTE-REAL, J. A. - Preliminary assessment of flood hazard in Nabão river basin using an Analytical Hierarchy Process. **AIP Conference Proceedings**. *in press*).

ANPC - **Guia para a caracterização de risco no âmbito da elaboração de planos de emergência de protecção civil** [Em linha]. Lisboa: Direcção Nacional de Planeamento de Emergência - Autoridade Nacional de Protecção Civil, 2009. [Consult. 2 fev. 2016]. Disponível na internet:

<URL:<http://www.prociv.pt/pt-pt/EDICOES/CADERNOSTECNICOS>>. ISBN 978-989-96121-6-7.

ANPC - **Avaliação Nacional de Risco** [Em linha]. Lisboa: Autoridade Nacional de Protecção Civil, Abr. 2014. Disponível na internet:

<URL:<http://www.prociv.pt/RISCOSVULNERABILIDADES/Pages/AvaliacaoNacionaldeRisco.aspx>>.

ANPC (ED.) - **Gestão do Risco de Inundação, documento de apoio a boas práticas** [Em linha]. Carnaxide, Portugal: Autoridade Nacional de Protecção Civil - Plataforma para a Redução do Risco de Catástrofes, 2016. Disponível na internet:

<URL:<https://24krqt.s.cld.pt/>>.

APA - **Plano de Gestão dos Riscos de Inundações. Região Hidrográfica 5 - Tejo e Ribeiros do Oeste**. Lisboa: Comissão Nacional da Gestão dos Riscos de Inundações, Maio 2016.

A.P.P. - Cidades - A natureza aliou-se para dilúvio inédito. **Diário de Notícias**. [Em linha] (21 fev. 2010). [Consult. 26 mai. 2017]. Disponível na internet:
<URL:<http://www.dn.pt/dossiers/cidades/inundacoes-em-portugal/noticias/interior/a-natureza-aliouse-para-diluvio-inedito-1500360.html>>.

AQUALOGUS/ACTION MODULERS - **Elaboração de Cartografia Específica sobre o Risco de Inundação para Portugal Continental. Relatório Final. Volume 1 - Memória descritiva** [Em linha]. Lisboa: Comissão Nacional da Gestão dos Riscos de Inundações, 2014. Disponível na internet:
<URL:<http://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=2&idItem=5.4>>.

AVEN, T. - Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. **European Journal of Operational Research**. ISSN 0377-2217. 253:1 (2016) 1–13. doi: 10.1016/j.ejor.2015.12.023.

BAKER, V. R. - Floods. Em Salem Press Encyclopedia of Science [Em linha] [Consult. 13 jun. 2016]. Disponível na internet:
<URL:<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=88953007&site=eds-live>>.

BELO, J. P. R. - **Os SIG Aplicados à Análise do Risco de Inundação Progressiva do Rio Tejo, entre Belver e Vila Nova da Barquinha, Região do Médio Tejo** [Em linha]. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2012 [Consult. 22 fev. 2016]. Disponível na internet:<URL:<https://repositorio.utad.pt/handle/10348/2480>>. Dissertação de Mestrado.

CHOW, V. T. - Hydrologic Studies of Floods in the United States. **Inter. Assoc. Sci. Hydrol.** 42 (1956) 134–170.

CHOW, V. T. - **Open-Channel Hydraulics**. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1959. ISBN 07-010776-9.

CHOW, V. T. *et al.* - Applied Hydrology. **McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering**. 1988).

CHRISTOFOLETTI, A. - **Geomorfologia fluvial. Volume 1 - canal fluvial**. [S.l.]: Editora Edgard Blücher, 1981.

CORREIA, M. M. R. C. - **Contribuição para Avaliação e Gestão de Riscos de Inundações. Caso de estudo: Bacia Hidrográfica do Rio Nabão** [Em linha]. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2013 [Consult. 26 fev. 2016]. Disponível na internet:

<URL:<http://run.unl.pt/handle/10362/10620>>. Dissertação de Mestrado.

CVARG/CIVISA - Mau tempo no Algarve provoca cheias rápidas Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos / Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores, 11 Fev. 2015. [Consult. 20 set. 2017]. Disponível na internet:

<URL:<http://www.cvarg.azores.gov.pt/noticias/Paginas/20151102-cheias-algarve.aspx>>.

DALE, P. - **Mathematical Techniques in GIS, Second Edition**. FL, USA: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4665-9554-5.

DGTERRITÓRIO - **Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal continental para 2010 (COS2010)** [Em linha], atual. 2010. [Consult. 2 dez. 2017]. Disponível na internet:

<URL:<http://mapas.dgterritorio.pt/geoportal/catalogo.html>>.

DGTERRITÓRIO - **DGTerritório - PT-TM06/ETRS89 - European Terrestrial Reference System 1989** [Em linha], atual. 26 nov. 2013. [Consult. 7 set. 2017]. Disponível na internet:

<URL:http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/geodesia/sistemas_de_referencia/portugal_continental/pt_tm06_etr89___european_terrestrial_reference_system_1989_2/>.

DGTERRITÓRIO - **CAOP em vigor** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 4 mar. 2016]. Disponível na internet:

<URL:http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal___caop_/caop_em_vigor/>.

EEA - **Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report.** EEA Report. Copenhagen, Denmark: European Environment Agency, 2012. (Relatório n.12/2012).

EEA - **Flood risks and environmental vulnerability: exploring the synergies between floodplain restoration, water policies and thematic policies.** EEA Report. Copenhagen, Denmark: European Environment Agency, 2016. (Relatório n.1/2016).

ESRI - **About editing data in a different projection (projecting on the fly. ArcGIS for Desktop Help** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 7 nov. 2017]. Disponível na internet: <URL:<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/editing-fundamentals/about-editing-data-in-a-different-projection-projecting-on-the-fly-.htm>>.

ESTOQUE, R. C. - Analytic Hierarchy Process in Geospatial Analysis. Em **Progress in Geospatial Analysis** [Em linha]. [S.l.] : Springer, Tokyo, 2012 [Consult. 22 nov. 2017]. Disponível na internet: <URL:https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-4-431-54000-7_11>. ISBN 978-4-431-53999-5. p. 157–181.

FAO - **Guidelines for soil description.** 4th ed ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006. ISBN 978-92-5-105521-2.

FBO CONSULTORES - **Adenda 1. Relatório 1 - Análise das cheias na situação actual. Estudo hidrológico e hidráulico no rio Nabão na zona de intervenção do programa POLIS na cidade de Tomar.** Lisboa: TomarPolis, 2003a.

FBO CONSULTORES - **Relatório 1 - Análise das cheias na situação actual. Estudo hidrológico e hidráulico no rio Nabão na zona de intervenção do programa POLIS na cidade de Tomar.** Lisboa: TomarPolis, 2003b.

FERNANDEZ, P.; MARQUES DA SILVA, J.; COUTINHO, M. A. - Simulação da erosão hídrica na rega por rampa rotativa utilizando técnicas de modelação espacial. Em **Actas do VIII Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica** [Em linha]. Oeiras : Associação dos Utilizadores de Informação Geográfica, 2004 [Consult. 2 fev. 2017]. Disponível na internet: <URL:http://ftp.igeo.pt/servicos/DPCA/biblioteca/publicacoesIGP/ESIG_2004/p082.pdf>.

FERNANDEZ, P.; MOURATO, S.; MOREIRA, M. - Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. **Revista Recursos Hídricos**. . ISSN 08701741. 34:1 (2013) 63–73. doi: 10.5894/rh34n1-5.

FONSECA, T. C. ; COSTA, E. M.; ZÊZERE, J. L. - A gestão risco no território, o contributo dos Planos Regionais de Ordenamento do Território. Em **Multidimensão e Territórios de Risco**. Guimarães: Imprensa da Universidade de Coimbra, RISCOS - Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 2014. ISBN 978-989-96253-3-4

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. - The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Journal of Hydrology**. ISSN 0022-1694. 193:1 (1997) 204–213. doi: 10.1016/S0022-1694(96)03138-1.

GOMES, A. J. G. - **Mitigação de Riscos e Ordenamento do Território** [Em linha]. Lisboa: Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, 2013 [Consult. 19 mai. 2016]. Disponível na internet:
<URL:<https://run.unl.pt/handle/10362/10697>>. Dissertação de Mestrado.

GONÇALVES, J. A. - **Conversão de coordenadas cartográficas e geográficas usando grelhas de transformação de datum** [Em linha], atual. 2008. a. [Consult. 29 jun. 2015]. Disponível na internet:
<URL:<http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/coordenadas/parte5.htm>>.

GONÇALVES, J. A. - **STRM 1 segundo. Dados altimétricos para Portugal** [Em linha], atual. 2008. b. [Consult. 1 dez. 2017]. Disponível na internet:
<URL:<http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/srtm/>>.

GONÇALVES, J. A. - Conversões de Sistemas de Coordenadas Nacionais para ETRS89 Utilizando Grelhas. **VI CNCG**. 2009).

GONÇALVES, P. - **A Delimitação de perímetros de Inundação no Rio Leça - modelação hidráulica para duas áreas do concelho de Matosinhos** [Em linha]. Porto : Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 2012 [Consult. 20 mai. 2016]. Disponível na internet:
<URL:<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/66357>>. Dissertação de Mestrado.

GOODCHILD, M. F. - Geographical information science. **International Journal of Geographical Information Systems**. ISSN 0269-3798. 6:1 (1992) 31–45. doi: 10.1080/02693799208901893.

GOODCHILD, M. F. - Geographic information system. Em **Leadership in Science and Technology** [Em linha]. Los Angeles: Sage, 2012 [Consult. 17 nov. 2016]. Disponível na internet: <URL: <http://www.geog.ucsb.edu/~good/papers/515.pdf>>. ISBN 978-1-4129-7688-6v. 2. p. 238–245.

GOOGLE MAPS - **Mapas Online Google** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 6 nov. 2017]. Disponível na internet: <URL: <https://www.google.pt/maps/>>.

GRUVER, A. - **Coordinate Transformations vs. Projecting-on-the-fly vs. Reprojecting | GEOG 486: Cartography and Visualization** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 7 nov. 2017]. Disponível na internet: <URL: <https://www.e-education.psu.edu/geog486/node/1886>>.

GUHA-SAPIR, D.; BELOW, R.; HOYOIS, P. - **EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database** [Em linha]. Brussels, Belgium : Université Catholique de Louvain, 2017. [Consult. 23 jan. 2017]. Disponível na internet: <URL: <http://www.emdat.be/>>.

GUIMARÃES, R. C. - Capítulo 2 – Bacia Hidrográfica. Em **Hidrologia Agrícola** [Em linha]. [S.l.] : ECT, ICAAM, Universidade de Évora, 2012 [Consult. 5 abr. 2016]. Disponível na internet: <URL: <http://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/7980>>. ISBN 978-989-97060-4-0

GUTIERRES, F. - **Aplicação SIG na Modelação Hidrológica e na elaboração de Cartografia temática de base para a avaliação de aptidões ambientais no Concelho do Barreiro** [Em linha]. Lisboa: Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 2008 [Consult. 27 set. 2016]. Disponível na internet: <URL: <http://www.ceg.ul.pt/investigadores.asp?id=113&tab=4#t>>. Curso Pós-Graduado.

HEC - **HEC-GeoRAS. GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS 10. User's manual. Version 10**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre, 2012.

HEC - **HEC-RAS, River Analysis System. User's Manual. Version 5.0** [Em linha]. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre, Fev. 2016. Disponível na internet: <URL:www.usace.army.mil>.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. - Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**. . ISSN 0022-1694. 268:1 (2002) 87–99. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00121-X.

INE - **Censos 2011 - Dados alfanuméricos e geográficos. Resultados Definitivos** [Em linha], atual. 2011. [Consult. 2 mar. 2016]. Disponível na internet: <URL:http://mapas.ine.pt>.

INE - **Base Cartográfica, Censos 2011** [Em linha], atual. 2014. [Consult. 20 nov. 2017]. Disponível na internet: <URL:http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos_base_cartogr>.

IPMA - **Portal do Clima** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 25 out. 2017]. Disponível na internet: <URL:http://portaldoclima.pt/pt/>.

IPMA - **Normais Climatológicas** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 15 nov. 2017]. Disponível na internet: <URL:http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. - Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric engineering and remote sensing**. 54:11 (1988) 1593–1600.

JULIÃO, R. P. - **Tecnologias de Informação Geográfica e Ciência Regional. Contributos Metodológicos para a Definição de Modelos de Apoio à Decisão em Desenvolvimento Regional**. Lisboa: Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Outubro 2001. Dissertação de Doutoramento.

JULIÃO, R. P. *et al.* - **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal**. Lisboa: ANPC, co-Ed. DGOTDU e IGP, 2009. ISBN 978-989-96121-4-3.

KILOM691 - nombres de Strahler (utile pour décrire fleuves et arbres). Em Wikipedia [Em linha] [Consult. 9 fev. 2017]. Disponível na internet:

<URL:[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Flussordnung_\(Strahler\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Flussordnung_(Strahler).svg)>.

LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. - **Lições de hidrologia**. 3ª ed. Lisboa : Fundação da Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade de Lisboa, 2006. ISBN 972-8152-59-0.

LNEG - **Hidrolex - Léxico de Termos Hidrogeológicos** [Em linha], atual. 2017. [Consult. 8 fev. 2017]. Disponível na internet:

<URL:http://geoportal.lneg.pt/index.php?option=com_content&id=54&lg=pt>.

LONGLEY, P. A. *et al.* - **Geographic Information Systems** [Em linha]. 1st. ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 1991. [Consult. 14 out. 2016]. Disponível na internet:

<URL:<http://www.wiley.com/legacy/wileychi/gis/volumes.html>>.

LONGLEY, P. A. *et al.* (EDS.) - **Geographical information systems: principles, techniques, management, and applications**. 2nd ed., abridged ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2005a. ISBN 978-0-471-73545-8.

LONGLEY, P. A. *et al.* - **Geographical information systems and science**. 2nd ed ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2005b. ISBN 978-0-470-87000-6.

LUSA - Cheias em Albufeira. Prejuízos participados superiores a 14 milhões de euros. **Jornal Expresso**. [Em linha] (17 nov. 2015). [Consult. 20 set. 2017]. Disponível na internet: <URL:<http://expresso.sapo.pt/sociedade/2015-11-17-Cheias-em-Albufeira.-Prejuizos-participados-superiores-a-14-milhoes-de-euros->>.

MACKENZIE, J. - **Dr. John Snow's map of the 1854 London cholera outbreak** [Em linha], atual. 2010. [Consult. 23 nov. 2016]. Disponível na internet: <URL:<https://www1.udel.edu/johnmack/frec682/cholera/>>.

MARAFUZ, I. - **Inundações Urbanas e Cheias Progressivas em Arouca. Casos de Estudo, Metodologias de Análise e Ordenamento do Território**. Porto: Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 2011 Dissertação de Mestrado.

- MENDONÇA, J. J. L. *et al.* - **Glossário de Termos Hidrogeológicos** [Em linha]. [S.l.]: Instituto da Água, Centro de Geologia da Universidade de Lisboa, 2000. [Consult. 8 fev. 2017]. Disponível na internet: <URL:<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779576358131/Glossario%20de%20Termos%20Hidrogeologicos.pdf>>.
- MERKURYEVA, G. *et al.* - Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. **Journal of Computational Science**. ISSN 1877-7503. 10:2014) 77–85. doi: 10.1016/j.jocs.2014.10.004.
- MEYER, V.; SCHEUER, S.; HAASE, D. - A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. **Natural Hazards**. ISSN 0921-030X, 1573-0840. 48:1 (2009) 17–39. doi: 10.1007/s11069-008-9244-4.
- MUSA, G. J. *et al.* - Use of GIS Mapping as a Public Health Tool—From Cholera to Cancer. **Health Services Insights**. ISSN 1178-6329. 6:2013) 111–116. doi: 10.4137/HSI.S10471.
- O’CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. - The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**. . ISSN 0734-189X. 28:3 (1984) 323–344. doi: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0.
- OLAYA, V. - **Sistemas de Información Geográfica** [Em linha] [Consult. 1 abr. 2016]. Disponível na internet: <URL:<http://volaya.github.io/libro-sig/index.html>>.
- OUMA, Y.; TATEISHI, R. - Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. **Water**. ISSN 2073-4441. 6:6 (2014) 1515–1545. doi: 10.3390/w6061515.
- QUARESMA, I. - **Inventariação e análise de eventos hidro-geomorfológicos com carácter danoso em Portugal continental** [Em linha]. Lisboa: Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, 2008 [Consult. 6 abr. 2017]. Disponível na internet: <URL:<http://repositorio.ul.pt/handle/10451/427>>. Dissertação de Mestrado.

RAMOS, C. - **Programa de Hidrogeografia** [Em linha]. Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa ed. Lisboa: [s.n.]. [Consult. 22 jun. 2016]. Disponível na internet: <URL:http://www.ceg.ul.pt/descarga/Publicacoes_Download/2005a.PDF>. ISBN 972-636-159-1.

RAMOS, C. - Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações. **e-LP Engineering and Technology Journal**. 4:0 (2013a).

RAMOS, C. - Dinâmica Fluvial e Ordenamento do Território Lisboa, 6 Nov. 2013b. [Consult. 13 fev. 2017]. Disponível na internet: <URL:https://www.apambiente.pt/_zdata/DPCA/AsQuartasAs17naAPA/APAasQuartas20131106_CatarinaRamos.pdf>.

RAMOS, C.; REIS, E. - As cheias no sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. **Finisterra**. ISSN 0430-5027. 36:71 (2001) 61–82. doi: 10.18055/Finis1648.

RAMOS, C.; ZÊZERE, J. L.; REIS, E. - Avaliação da susceptibilidade aos perigos naturais da Região de Lisboa e Vale do Tejo. Departamento de Prospectiva e Planeamento e Relações Internacionais. **Prospectiva e Planeamento**. 17:2010) 57–73.

RAPOSO, L. - A tragédia provocada pelas cheias de 1967 | DN 150 anos. **Diário de Notícias**. [Em linha] (29 set. 2014). . [Consult. 5 abr. 2017]. Disponível na internet: <URL:<http://150anos.dn.pt/2014/09/29/a-tragedia-provocada-pelas-cheias-de-1967/>>.

RIBEIRO, A. Á. - **Hidrologia - Águas Superficiais**. [S.l.]: Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Laboratório de Hidráulica, 1987.

RITTER, M. - **Drainage Patterns. The Physical Environment: an Introduction to Physical Geography** [Em linha], atual. 5 jun. 2012. [Consult. 19 jul. 2017]. Disponível na internet: <URL:http://www.earthonlinemedia.com/ebooks/tpe_3e/fluvial_systems/drainage_patterns.html>.

ROCHA, J. - Prevenção de inundações e reabilitação de edifícios em zonas inundáveis. **Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança**. 2 (1995).

RODRIGUES, C. M.; GUIMARÃES, R. C.; MOREIRA, M. - **Apontamentos para as aulas de Hidrologia** [Em linha]. Évora: [s.n.] [Consult. 1 fev. 2017]. Disponível na internet: <URL:https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/4721>.

RTP - Recordamos as cheias de 1967 RTP Notícias, , 26 Nov. 2007. [Consult. 5 abr. 2017]. Disponível na internet: <URL:https://www.rtp.pt/noticias/pais/recordamos-as-cheias-de-1967_v169498>.

SÁ, L.; VICÊNCIO, H. - Risco de Inundações - Uma metodologia para a sua cartografia. **Territorium**. ISSN 0872-8941. 18 (2011) 227–230.

SAATY, T. L. - **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York; London: McGraw-Hill International Book Co, 1980. ISBN 978-0-07-054371-3.

SHREVE, R. L. - Statistical Law of Stream Numbers. **The Journal of Geology**. ISSN 0022-1376. 74:1 (1966) 17–37. doi: 10.1086/627137.

SIMONITE, T. - Moore’s Law Is Dead. Now What? **MIT Technology Review**. [Em linha]2016). [Consult. 23 nov. 2016]. Disponível na internet: <URL:https://www.technologyreview.com/s/601441/moores-law-is-dead-now-what/>.

SNIAMB - APA - **Principais Bacias Hidrográficas (DQA)** [Em linha], atual. 2010. [Consult. 6 nov. 2016]. Disponível na internet: <URL:http://sniamb.apambiente.pt/infos/shpzip/vw_bacias_principais_dqa.zip>.

SNIAMB - APA - **Bacias dos troços de linha de água GeoCodificadas** [Em linha], atual. 2015. [Consult. 6 nov. 2016]. Disponível na internet: <URL:http://sniamb.apambiente.pt/infos/shpzip/vw_baccod_25k_ptcont.zip>.

SNIAMB - APA - **Atlas do Ambiente -- Carta Litológica** [Em linha], atual. 2016. a. [Consult. 6 nov. 2016]. Disponível na internet: <URL:http://sniamb.apambiente.pt/infos/shpzip/AtAmb/AtAmb_1013111_CLitologica_Cont.zip>.

SNIAMB - APA - **Atlas do Ambiente -- Carta de Solos** [Em linha], atual. 2016. b. [Consult. 6 nov. 2016]. Disponível na internet:

<URL:http://sniamb.apambiente.pt/infos/shpzip/AtAmb/AtAmb_3001111_CSolos_Cont.zip>.

SNIAMB - APA - **SNIAmb - Sistema Nacional de Informação de Ambiente** [Em linha], atual. 2016. c. [Consult. 6 nov. 2016]. Disponível na internet:

<URL:<http://sniamb.apambiente.pt/Home/Default.htm>>.

SNIAMB - APA - **Rede hidrográfica GeoCodificada** [Em linha], atual. 2016. d. [Consult. 6 nov. 2016]. Disponível na internet:

<URL:http://sniamb.apambiente.pt/infos/shpzip/vw_hidcod_25k_ptcont_3.zip>.

SNIRH - Dados de base de monitorização de hidrometria. 2016).

SNIRH; ANPC - SNIRH - Cheias. Marcas e referências a cheias e inundações. 2017).

SOUSA, J.; GONÇALVES, J. A.; MADEIRA, S. - **Topografia - Conceitos e Aplicações**. 3ª Edição ed. Lisboa. Lidel - Edições Técnicas, Lda., 2012. ISBN 9789727575804.

SOUZA, U. D. V.; KUX, H. J. H. - Analyse the Vulnerability in the Maranhão Ilha, Brazil, using GIS Techniques and Geospatial Inference. **Revista Geográfica de América Central**. 2:47E (2011).

STRAHLER, A. N. - Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Em CHOW, V. T. (Ed.) - **Handbook of Applied Hydrology**. [S.l.]: McGraw-Hill, New York, 1964. p. 4-39/4-36.

STRAHLER, A. N. - **Physical geography** Wiley international edition. 4th ed ed. New York: Wiley & Sons, 1975. ISBN 978-0-471-83179-2.

TARBOTON, D. G. - Terrain analysis using digital elevation models in hydrology. Em **23rd ESRI international users conference, San Diego, California** [Em linha] [Consult. 22 jun. 2015]. Disponível na internet:

<URL:<http://nrac.wvu.edu/classes/resm575/readings/tarboton.pdf>>.

TARBOTON, D. G. - **Watershed Delineation Using Taudem - A tutorial for using TauDEM to delineate a single watershed - TauDEM 5.0** [Em linha]. [S.l.]: Utah State University, 2011. [Consult. 12 jul. 2017]. Disponível na internet:

<URL:<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/TauDEM5DelineatingASingleWatershed.pdf>>.

TOBLER, W. - Measuring Spatial Resolution. Em **Proceedings of Land Resources Information Systems Conference**. Beijing: [s.n.]

TOMLINSON, R. - **Origins of the Canada Geographic Information System** [Em linha], atual. 2012. [Consult. 23 nov. 2016]. Disponível na internet:

<URL:<http://www.esri.com/news/arcnews/fall12/articles/origins-of-the-canada-geographic-information-system.html>>.

TSF - Quercus: Três anos depois do temporal, nada mudou na Madeira. **TSF Rádio Notícias**. [Em linha] (20 fev. 2013). [Consult. 26 mai. 2017]. Disponível na internet:

<URL:<http://www.tsf.pt/vida/interior/quercus-tres-anos-depois-do-temporal-nada-mudou-na-madeira-3062932.html>>.

UNDRO - **Natural disasters and vulnerability analysis: report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979)** [Em linha]. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, 1980. [Consult. 26 set. 2017]. Disponível na internet:

<URL:<http://archive.org/details/naturaldisasters00offi>>.

VARGAS, R. V.; IPMA-B, P. - Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process-AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. Em **PMI Global Congress**

WESTEN, C. VAN - Geoinformation Science and Earth Observation for municipal risk management. The SLARIM project. Em **Emergency and disaster response with GIS** [Em linha]. Seoul, Korea: Korea Research Institute for Human Settlements, 8 Set. 2004 [Consult. 3 dez. 2017]. Disponível na internet:

<URL:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.618.5084&rep=rep1&type=pdf>>.

WING, M. G.; BETTINGER, P. - **Geographic information systems: applications in natural resource management**. 2nd. ed. Don Mills, Ont.; New York: Oxford University Press, 2008. ISBN 978-0-19-542610-6.

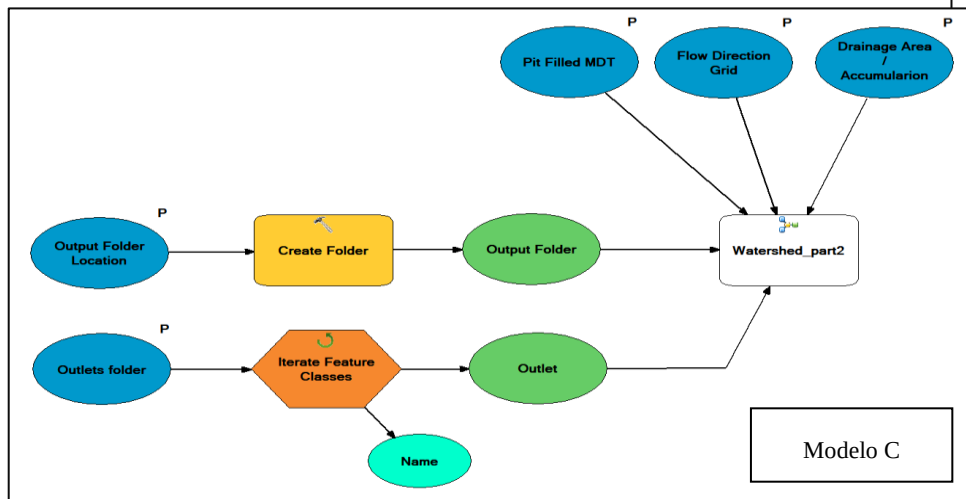
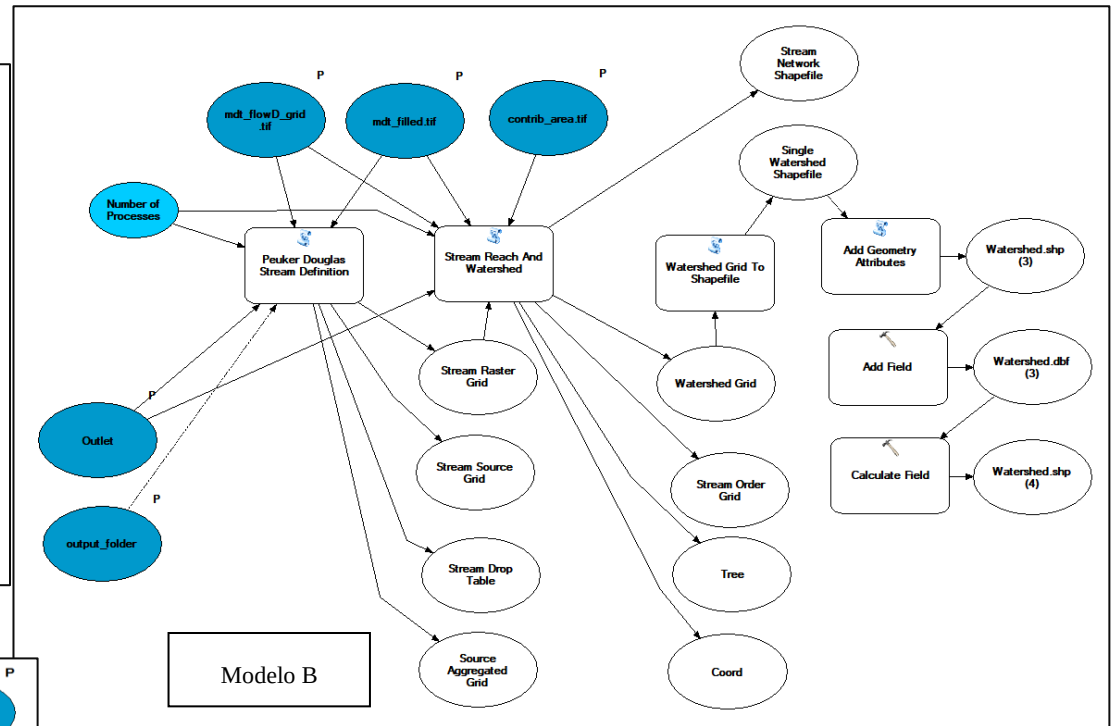
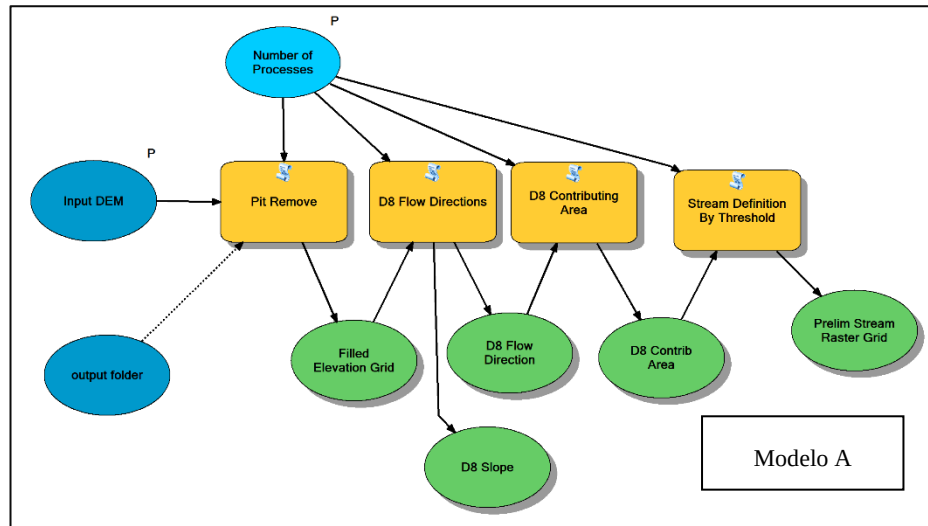
ZAHEDI, F. - The Analytic Hierarchy Process -- A Survey of the Method and its Applications. **Interfaces**. ISSN 00922102. 16:4 (1986) 96–108.

ZÊZERE, J. L. - Riscos e Ordenamento do Território. **Inforgeo**. Julho de 2007 (2007) 59–63.

ZÊZERE, J. L. *et al.* - DISASTER: a GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. **Natural Hazards**. ISSN 0921-030X, 1573-0840. 72:2 (2014) 503–532. doi: 10.1007/s11069-013-1018-y.

ZÊZERE, J. L.; PEREIRA, A. R.; MORGADO, P. - Perigos naturais e tecnológicos no território de Portugal Continental. Em **A Geografia Ibérica no Contexto Europeu** [Em linha]. Évora: Universidade de Évora, 2005 [Consult. 29 mar. 2016]. Disponível na internet: <URL:https://www.researchgate.net/profile/Jose_Zezere/publication/268401258_PERIGOS_NATURAIS_E_TECNOLGICOS_NO_TERRITRIO_DE_PORTUGAL_CONTINENTAL/links/55d1eb7c08ae2496ee658730.pdf>.

Anexo A. Modelos de análise espacial para definição da rede de drenagem e a delimitação da bacia hidrográfica implementado (Tarboton, 2011).



A – Criação da rede de drenagem preliminar.

B – Definição da rede de drenagem e delimitação da bacia hidrográfica.

C – Modelo para correr o Modelo B em lote (tratamento encadeado de várias bacias).

Anexo B. AHP - Análise hierárquica de processos

O Método AHP pressupõe uma hierarquização e identificação de relações entre os diferentes parâmetros, pelo que se encontra fortemente dependente da tomada de decisão. Esta tomada de decisão está ligada à avaliação através de comparações de pares de parâmetros em cada nível da hierarquia. Esta é baseada numa escala de prioridades que diferenciam a importância dos critérios, conduzindo à determinação dos pesos estatísticos do modelo. Para se efectuar uma escala de prioridades que reflecta o fenómeno em estudo é imperativo conhecer a escala de comparação criada por Saaty (1980) (Tabela B.1) que vai de 1 significando a indiferença de importância de um critério sobre o outro, a 9 que indica a extrema importância de um critério sobre o outro. Desta resultará uma matriz quadrada, a matriz de comparação, A.

Por exemplo, para 3 parâmetros A pode ser dada por $A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}$.

Determinação dos pesos estatísticos do modelo

O método de elaboração da matriz de decisão faz uso de uma escala de comparação que define linearmente a hierarquia de importância entre factores pré-definidos, no caso da BH do Nabão, altitude, declividade, uso e ocupação do solo e tipo de solo. Esta escala traduz o grau de importância de cada factor face a outro e encontra-se exposta na Tabela B.1.

Destas relações de reciprocidade é gerada uma matriz de comparação, na qual os elementos da diagonal principal são sempre iguais à unidade, dado que um elemento será sempre igualmente importante a ele próprio. Acima (abaixo) da diagonal principal teremos os valores que resultam das comparações que advêm da Tabela B.1 e na parte inferior (superior) os respectivos valores recíprocos. A consistência desta matriz, deverá, no entanto, ser garantida.

Tabela B.1. Escala de comparação de factores. Adaptado de (Ouma e Tateishi, 2014).

Grau de importância	Definição
1	Igualmente importante.
3	Moderadamente mais importante.
5	Fortemente mais importante.
7	Muito fortemente mais importante.
9	Extremamente mais importante.
Recíprocos dos valores acima	Se a um dos valores acima é atribuído a um elemento i , comparativamente a um elemento j , então j tem valor recíproco quando comparado com i .

A aplicação do modelo multicritério AHP, pode ser resumida nas seguintes etapas:

- Definição do problema;
- Decomposição do problema, estabelecendo hierarquias;
- Obtenção da matriz de comparação;
- Calcular o IC (índice de consistência), de acordo com (13):

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (13)$$

no qual n é a ordem da matriz e λ_{max} o máximo valor dos valores próprios. De facto, o método procura o valor próprio máximo que pode ser determinado através do produto de A pelo vector coluna das prioridades, ou seja, os pesos w , sendo que $Aw = \lambda w$. Pelo que, o valor de λ_{max} se determina a partir de (14):

$$\lambda_{max} = \text{média do vector } \frac{Aw}{w}. \quad (14)$$

Caso o valor do IC não seja satisfatório, dever-se-ão refazer os julgamentos. Neste caso, se o índice de consistência for menor do que 0,1, então considera-se que o critério de julgamento é consistente, pelo que se pode prosseguir para a etapa seguinte.

- Cálculo da razão de consistência (RC), seguindo (15):

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (15)$$

no qual IC é determinado por (13) e IR varia com o tamanho da amostra compreendida entre 1 e 15 cujos valores se encontram na Tabela B.2 de acordo com Saaty (1980).

Tabela B. 2. Valor médio de IR (Saaty,1980).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

- Calcular os pesos para determinação do índice. No caso particular deste trabalho, foram considerados quatro parâmetros: a elevação, a declividade, o uso e ocupação do solo e o tipo de solo, pelo que o índice de risco de inundação é obtido por intermédio de (16):

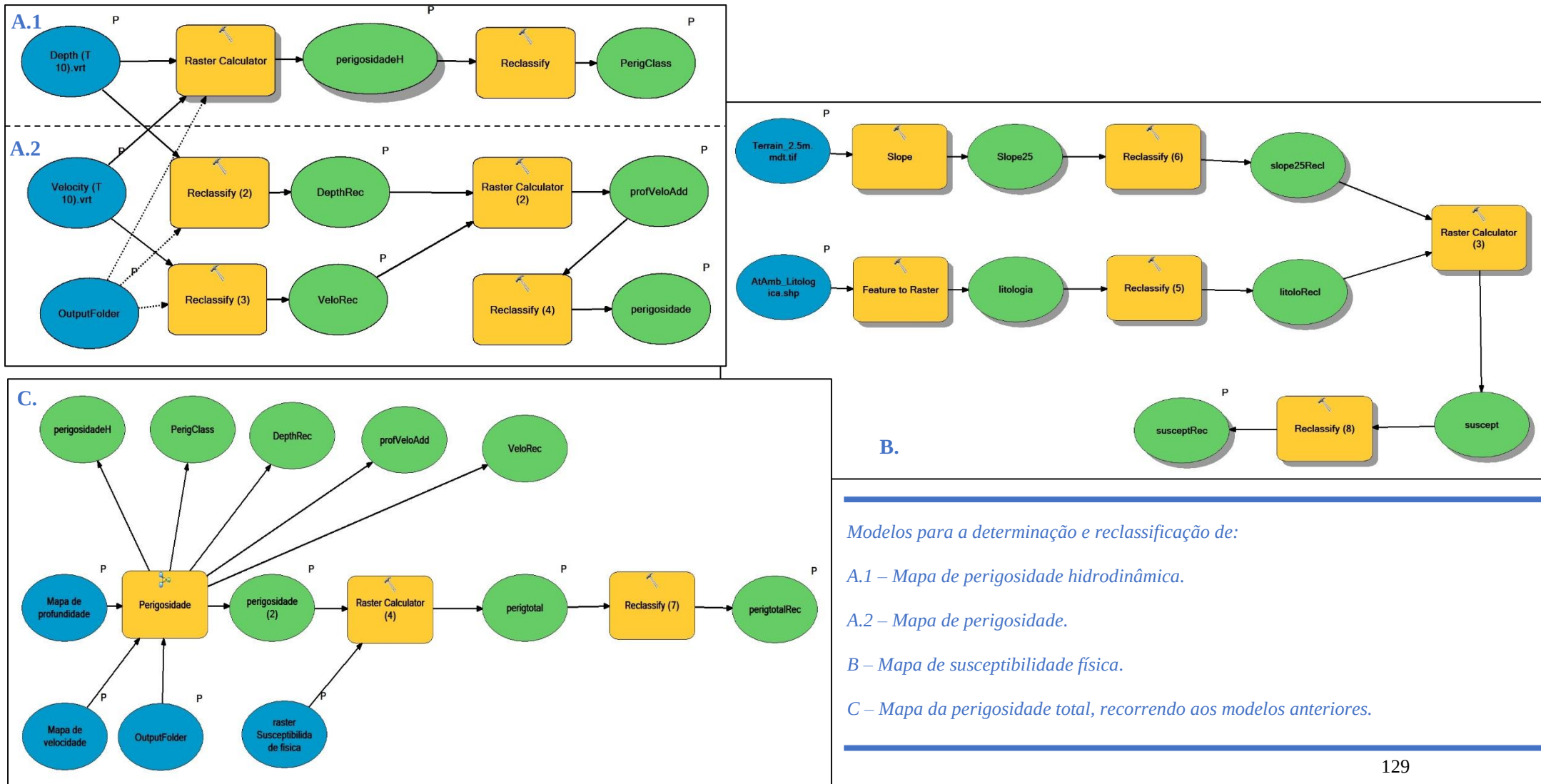
$$FHI = \sum_{i=1}^n r_i w_i = w_{EL}EL + w_{DE}DE + w_{UOS} + w_{TS}TS. \quad (16)$$

Foram consideradas 10 classes para o parâmetro EL, 6 classes para a declividade. O tipo de solo da bacia divide-se em três grandes grupos que seguem a classificação da (FAO, 2006) na qual os solos são divididos em 9 grupos. Para o parâmetro UOS foram considerados os dois primeiros níveis do COS segundo a Tabela B.3.

Tabela B.3. Legenda COS, níveis 1 e 2 (DGTerritório, 2010).

Nível 1	Nível 2
1 Territórios artificializados	1.1 Tecido urbano
	1.2 Indústria, comércio e transportes
	1.3 Áreas de extracção de inertes, áreas de deposição de resíduos e estaleiros de construção
	1.4 Espaços verdes urbanos, equipamentos desportivos, culturais e de lazer, e zonas históricas
2 Áreas agrícolas e agro-florestais	2.1 Culturas temporárias
	2.2 Culturas permanentes
	2.3 Pastagens permanentes
	2.4 Áreas agrícolas heterogéneas
3 Florestas e meios naturais e semi-naturais	3.1 Florestas
	3.2 Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea
	3.3 Zonas descobertas e com pouca vegetação
4 Zonas húmidas	4.1 Zonas húmidas interiores
	4.2 Zonas húmidas litorais
5 Corpos de água	5.1 Águas interiores
	5.2 Águas marinhas e costeiras

Anexo C. Modelos de análise espacial utilizados para o processamento de parâmetros para a determinação da perigosidade hidrodinâmica e perigosidade total de inundação.



Modelos para a determinação e reclassificação de:

A.1 – Mapa de perigosidade hidrodinâmica.

A.2 – Mapa de perigosidade.

B – Mapa de susceptibilidade física.

C – Mapa da perigosidade total, recorrendo aos modelos anteriores.

Anexo D. Preliminary assessment of flood hazard in Nabão river basin using an Analytical Hierarchy Process

ANDRADE, C.; RODRIGUES, S.; CORTE-REAL, J. A. - Preliminary assessment of flood hazard in Nabão river basin using an Analytical Hierarchy Process. **AIP Conference Proceedings**. *in press*).

Preliminary assessment of flood hazard in Nabão river basin using an Analytical Hierarchy Process

C. Andrade^{a, b, c}, S. Rodrigues^a and J. A. Corte-Real^d

^a*Polytechnic Institute of Tomar, Natural Hazards Research Center, Quinta do Contador, Estrada da Serra, 2300-313 Tomar, Portugal (c.andrade@ipt.pt)*

^b*CITAB, University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Quinta dos Prados, Apart. 1013, 5000-801 Vila Real, Portugal*

^c*CESAM, University of Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal*

^d*University Lusófona of Humanities and Technologies, DAT/DREAMS, Campo Grande 376, 1749-024, Lisboa, Portugal and ICAAM, University of Évora, Núcleo da Mitra, Apartado 94, 7002-774, Évora, Portugal*

Abstract. Floods are natural phenomena that have a major impact on society, agriculture and socioeconomic activities. Therefore, flood hazard mapping plays a key role in the decision-making process since it provides essential information to improve the understanding of the nature, risk and characteristics of floods. The application of a GIS-based multi-criteria analysis in the context of flood risk assessment has been recognized as a powerful tool to integrate and analyze data from different sources, thus providing different scenarios. The present work introduces the results of a preliminary assessment of flood hazard areas in the Nabão River basin located in the center of Portugal. Results show that 50% of Nabão River basin is prone to moderate flood hazard. It is noticeable that, 27% and 11% of this basin is susceptible to high and very high flood risk, respectively. These areas are those closest to Nabão River and its tributaries, as expected and are generally laying at low elevations. A high concentration within settled and paved areas, mainly affecting Tomar city and a relevant area within this municipality was also depicted. However urban paved surfaces hinder water infiltration of runoff, thus increasing the flood risk, results also show the relevance of land use and soil type within this basin. The lower infiltration and poor planning in the vicinity of alluvial plains and river banks can also be inferred in non-urban areas that revealed to be highly vulnerable to floods.

Keywords: Floods, Mapping, AHP, Nabão River basin, Portugal.

PACS: 92.60.Bh

INTRODUCTION

Natural hazards are natural phenomena potentially damaging that occur in biosphere, thus causing serious losses to the communities in the most vulnerable or exposed territories. Floods, landslides and other natural hazards are thus usually linked to the occurrence of losses, whether economic, patrimonial, social or environmental. Within this context, the assessment of the risk, can be considered as the probability of harmful consequences or losses resulting from the interaction between natural hazards and human systems. Due to the increase of human population associated to urban expansion, areas prone to floods are becoming increasingly occupied thus enhancing the impact of possible flood events (Degiorgis *et al.*, 2012; Tehrany *et al.*, 2013).

All catastrophes have a spatial component and hence adequate geographic information on hazards or areas vulnerable to their occurrence is essential to mitigate their impacts. Indeed, flood hazard mapping plays a key role in the decision-making process since it provides essential information to the understanding of the nature, risk and characteristics of flooding of the territories that could be affected by the flood. It also plays an important role when it comes to land use management and planning (Coppock, 1995; Lowery *et al.*, 1996; Malczewski, 1999). Furthermore, flood studies are important since they can assess its effect on human health, living conditions, property and on the economy of a region.

A flood hazard map is a map which shows flood scenario with high, medium and low flood event probabilities. The application of a GIS-based multi-criteria analysis in the context of flood risk assessment has been recognized as a powerful tool to integrate and analyze data from different sources, thus providing different scenarios (Meja-Navarro *et al.*, 1994; Black and Burns, 2002). The main advantage of using GIS is that it not only generates a visualization of flood prone areas, but also creates potential to further analyze these events to estimate probable damages due to floods (Kazakis *et al.*, 2015).

The present work introduces the results of a preliminary assessment of flood hazard areas in the Nabão River basin located in the center of Portugal. A spatial analysis in a GIS environment has been applied in order to produce a flood risk map to this region. The developed methodology processes information of four parameters, namely, elevation, slope, land use and soil type. The relative importance of each parameter has been linked to weight values. These values are calculated following an Analytical Hierarchy Process (Saaty, 1990a, 1990b; Ho, 2008). According to their weight values, information of the different parameters is superimposed, thus resulting in a flood hazard mapping. Further development of this methodology is presented herein.

DATA AND METHODOLOGY

Nabão River Basin

The study area, Nabão River basin, is located in central Portugal and comprises the districts of Santarém and Leiria (**FIGURE 1**). The Nabão River belongs to the Tagus River watershed and is a tributary of Zêzere River. Nabão has three smaller tributaries, Ribeiras da Bezelga, Olival and Seiça. Nabão's source is located in Lagarteira (in Ansião municipality) and end up to Zêzere River. It is 61.47 km long and the river basin covers an area of 1,053 km². The drainage network is well-developed with a dendritic form and has an annual average flow of 11.56 m³/s.

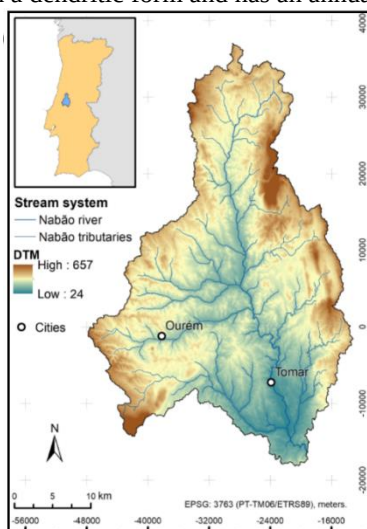


FIGURE 1. Nabão River basin digital terrain model, stream system and location in Portugal.

The maximum elevation, around 657m is found in Serra de Aire (**FIGURE 2a**) and the mean slope is 9.25% (**FIGURE 2b**). The populational density is around 91.5 (inhabitants/km²), forests and agriculture land, cover most of the territory (**FIGURE 2c**). A variety of rocks and sediments composes the geological background of this basin. The type of soil is basically composed by cambisols, lithosols and luvisols (major orders by FAO/UNESCO) (**FIGURE 2d**). The climate of this area is characterized by hot and dry summers, especially near Tomar, and cold and wet winters.

Flood Hazard Index (FHI) and the Analytical Hierarchy Process (AHP)

An index model has been developed in a GIS environment aiming to define flood hazard areas in Nabão River basin. In a 1st phase, information from several data sources is fed in the GIS, namely a digital terrain model (DEM), soil type and land use attained from www.dgterritorio.pt project COS2007 (levels 1 and 2, **TABLE 1**). After being processed, in a 2nd phase to each parameter a weight is defined thus conducting to a Flood Hazard Index (FHI). The identification of flood prone areas is verified by comparing them with known historical data.

The preliminary assessment of FHI to this basin comprises four criterion-parameters, namely, elevation (EL), slope (SL), land use (LU) and soil types (ST). The weight of each parameter is defined following the methodology proposed by Saaty (1990a, b) the Analytical Hierarchy Process (AHP).

The weight of each parameter is defined following a criterion which in turn is sorted in a hierarchical manner. Hence, a pairwise-comparison matrix for each criterion is created (**TABLE 2**) which enables a significance comparison. The evaluation is performed from 1 to 9, indicating a relative significance from less to much more relevant, respectively (Saaty, 1980).

TABLE 1. Land use classification and description (COS2010).

Level 1	Level 2			
1. Artificial territories	1.1 Urban	1.2 Industry, commerce and transports	1.3 Inert extraction areas, waste disposal sites and construction areas	1.4 Green urban spaces, sports, cultural and leisure equipment's, and historical areas
2. Agroforestry and agricultural areas	2.1 Temporary cultures	2.2 Permanent cultures	2.3 Permanent pasture	2.4 Heterogeneous agricultural areas
3. Forests, natural environments and semi-natural ecosystems	3.1 Forests	3.2 Open forests, shrubby and herbaceous vegetation	3.3 Open areas and areas with scarce vegetation	
4. Wetlands	4.1 Inland Wetlands	4.2 Coastal wetlands		
5. Bodies of water	5.1 Inland waters	5.2 Marine and coastal waters		

Furthermore, an evaluation for each grid-point of each parameter of the study area is performed, followed by an assignment of a rating score scale between 2 and 10. Each parameter is then accordingly reclassified, for example slope was reclassified following the classes present in **TABLE 3**. Finally, FHI can be calculated by:

$$FHI = \sum_{i=1}^n r_i w_i = w_{EL}EL + w_{SL}SL + w_{LU}LU + w_{ST}ST \quad (1)$$

in which, n is the number of the criteria, r_i is the rating of the parameter in each point, w_i is the weight of each parameter.

In a 3rd step, the mathematical process allows to perform a consistency evaluation that is summarized herein. An evaluation matrix A is formed with the quotient of weights of the criteria. Note that the relative weights are given by the right eigenvector (w) corresponding to the largest eigenvalue λ_{max} . If the pairwise comparisons are completely consistent, the rank of matrix A is 1 and $\lambda_{max}=n$. Hence, in this case weights can be computed by normalizing any of the rows or columns of A . The consistency index (CI) is given by:

$$CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \quad (2)$$

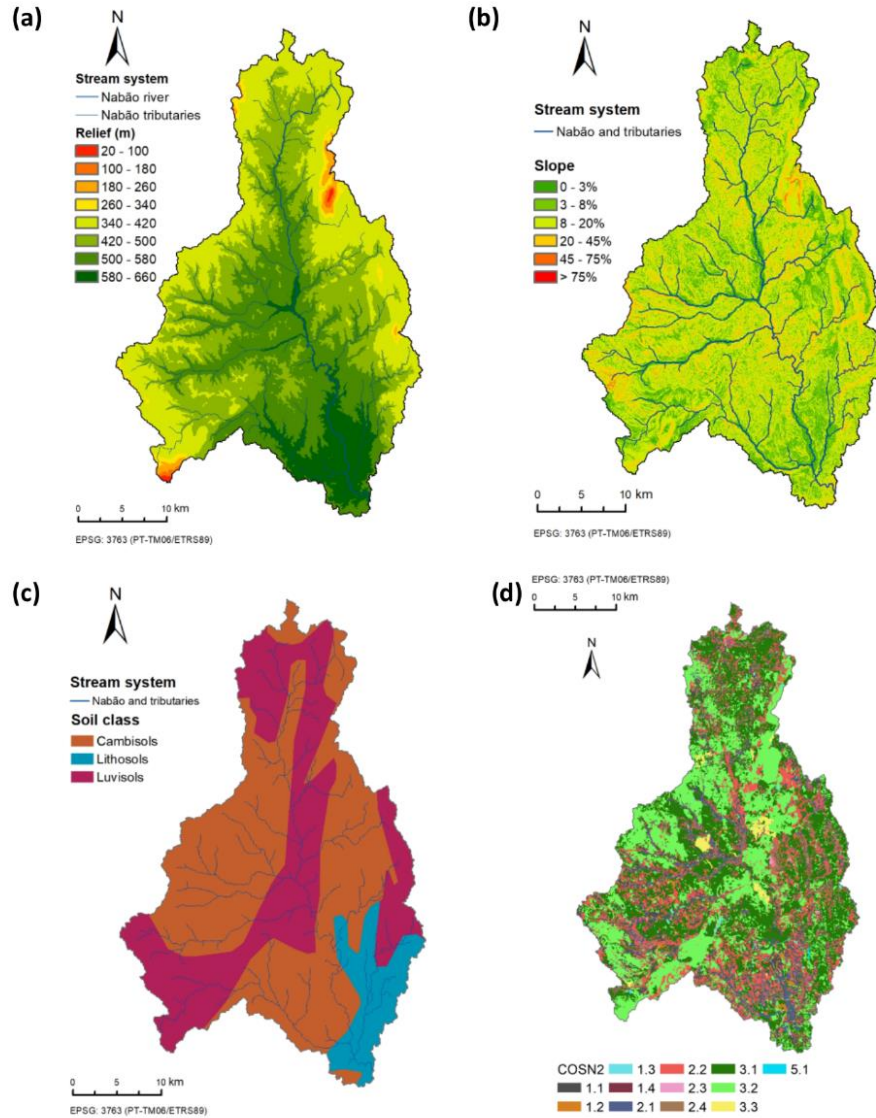


FIGURE 2. Nabão River basin (a) elevation classes (in m), (b) slope classes (in %), (c) soil type classes (order) and (d) land use (following level 2 COS2007 classification, **TABLE 1**).

Lastly, a consistency ratio (CR) is calculated to conclude whether the evaluations are sufficient. Towards this aim, the ration between CI and a random index (RI) attained by averaging the CI of a randomly generated reciprocal matrix (**TABLE 4**), results in:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

for which a maximum threshold of 10% is then established. This measure of consistency can be used to evaluate the consistency of decision makers, as well as, the consistency of the overall hierarchy.

TABLE 2. Criterion-parameter of flood hazard (AHP), pairwise comparison matrix

	Elevation (EL)	Slope (SL)	Land use (LU)	Soil type (ST)
Elevation (EL)	1	0.333	0.2	0.143
Slope (SL)	3	1	0.33	0.2
Land use (LU)	5	3	1	0.333
Soil type (ST)	7	5	3	1

TABLE 3. Slope classes and corresponding rating scores

Slope (classes)	Rating score	Area (%)
0 – 3%	10	8.26
3 - 8%	9	26.10
8 - 20%	5	49.99
20 - 45%	3	15.36
45 – 75%	1	0.29
> 75%	1	< 0.01

TABLE 4. RI values form square matrices of order n (Saaty, 1980a)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

MAIN RESULTS AND CONCLUSIONS

For this preliminary assessment, a three-level structure was developed to take into consideration both physical and socio-economic factors. As aforementioned, these factors comprised of: elevation from a DTM (EL), slope (SL) computed from the DTM, land use (LU) and soil types (ST). The river basin boundary is used as a constraint factor in this analysis. By structuring data in this way (**FIGURE 3**), AHP is going to be used as a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) in a multi-criteria decision-making process supported by ArcGIS.

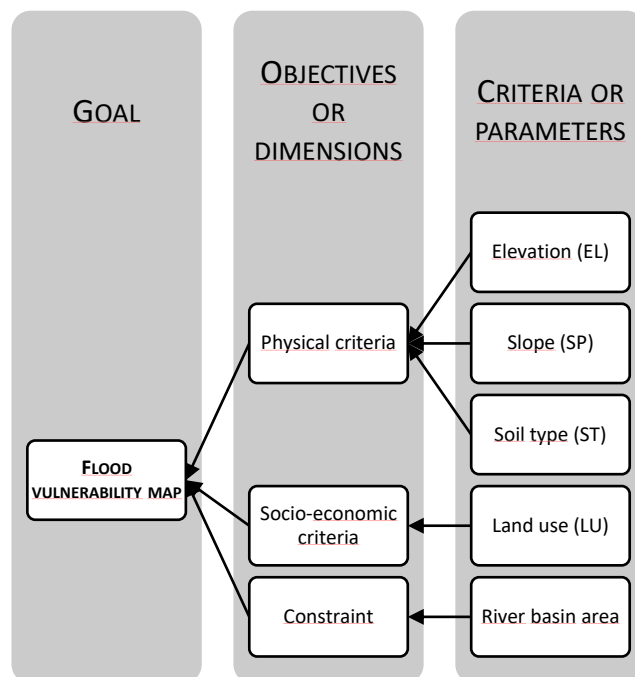


FIGURE 3. A three-level hierarchical structure of the characteristics of the parameters that will represent flood vulnerability in Nabão River basin.

In the AHP-GIS schema application, the parameters concerning the flood risk have been evaluated and weighted by using the fundamental scale for pairwise comparisons (**TABLE 2**). From a theoretical viewpoint, one is associated a lower risk, whilst the closest to ten the higher the risk. This methodology will allow to attain a quantitative rating and comparison between critical flood prone zones in Nabão River basin. The flood risk map is going to be classified into risk classes, with a scale that varies from ‘very low’ to ‘very high’ risk zones (**TABLE 5**).

TABLE 5. Flood risk classes

Classes	Risk
1 – 2	Very low
2 – 4	Low
4 – 6	Moderate
6 – 8	High
8 – 10	Very high

The results of the pairwise comparison and ranking (**TABLE 2**) allowed to achieve a consistency ratio $CR=0.046$, thus below the 10% threshold ($\lambda_{max} = 4.123$ and $CI = 0.041$). The CR indicates a high level of consistency in the pairwise judgments, consequently the determined weights are acceptable. The computed eigenvectors were then used as coefficients (4) as a coefficient for the respective factor maps to be combined in the weighted overlay.

$$FHI = 0.057SL + 0.122EL + 0.264ST + 0.558LU \quad (4)$$

As abovementioned, once the weights for the factors are computed, a multi-criteria evaluation is performed to derive the flood vulnerability or hazards map that can be depicted in **FIGURE 4**. Results show that 61.9% of Nabão River basin was prone to low flood hazard. It is worth notice that, 12.5% and 15% of this territory is susceptible to moderate and high-risk flood, respectively, and only 2.2% to very-high risk. These areas are those closest to Nabão river and its tributaries, as expected and are generally laying at low elevations. They have also a high concentration within settled and paved areas, mainly affecting Tomar city (high and very-high risk) and a relevant area within this municipality. However urban paved surfaces hinder water infiltration of runoff, thus increasing the flood risk, results also show the relevance of land use and soil type within this basin. The lower infiltration and poor planning near the alluvial plains and river banks can also be inferred in non-urban areas that revealed to be highly vulnerable to floods.

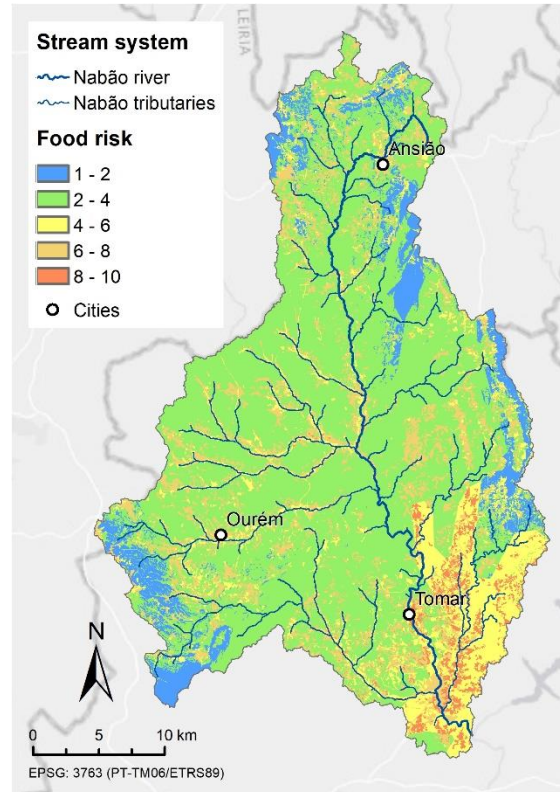


FIGURE 4. Nabão River basin flood risk map.

Determine the flood vulnerable areas and assessing the risk is highly relevant, since it allow decision makers a better planning and management policies in their municipalities territories. This study is a preliminary assessment of flood hazards in the Nabão River basin and is going to be subjected to further developments in a near future. The versatility of AHP in flood studies linked to other parameters and approaches will be investigated.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by: European Investment Funds by FEDER/COMPETE/POCI– Operational Competitiveness and Internationalization Programme, under Project POCI-01-0145-FEDER-006958 and National Funds by FCT - Portuguese Foundation for Science and Technology, under the project UID/AGR/04033/2013. It is also supported by POCentro_PT2020_FEDER.

REFERENCES

1. Black, A.R., Burns, J. C. Re-assessing the flood risk in Scotland. *Sci. Total Environ.* **294** (1) (2002), pp. 169-184.
2. Carta de Uso e Ocupação do Solo de Portugal Continental para 2007 (COS2007), Memória descritiva, Instituto Geográfico Português, dezembro de 2010, 87p (www.dgterritorio.pt).
3. Coppock, J.T. GIS and natural hazards: An overview from a GIS perspective. In *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*; Carrara, A., Guzzetti, F., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 1995; Volume 6, pp. 21–34.
4. Degiorgis, M., Gnecco, G., Gorni, S., Roth, G., Sanguineti, M., Taramasso, C. A. Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. *J. Hydrol.*, **470–471** (2012), pp. 302-315, 10.1016/j.jhydrol.2012.09.006 (ISSN 00221694).
5. Ho, W. Integrated Analytic Hierarchy Process and its applications: A literature review. *Eur. J. Oper. Res.*, **18**, (2008), pp. 211–228.
6. Kazakis, N., Kougias, I., Patsialis, T. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Sci. if the Tot. Env.* **538** (2015), pp. 555-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>.
7. Lowery, B.; Hickey, W.J.; Arshad, M.A.; Lal, R. Soil Water Parameters and Soil Quality; Doran, J.W., Jones, A.J., Eds.; *Methods for Assessing Soil Quality*; Madison, WI, USA, 1996; pp. 143–55.
8. Malczewski, J. GIS and Multi-Criteria Decision Analysis; Wiley: New York, NY, USA, 1999.
9. Meja-Navarro, M., Wohl, E.E., Oaks, S.D. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*, **10** (1–4) (1994), pp. 331-354, 10.1016/0169-555X(94)90024-8 (ISSN 0169555X).
10. Ouma, Y.O., Tateishi, R. Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. *Water*, **6** (2014) pp. 1515-1545. Doi:10.3390/w6061515.
11. Saaty, T.L. An exposition of the ahp in reply to the paper remarks on the analytic hierarchy process. *Manag. Sci.*, **36** (3) (1990b), pp. 259-268.
12. Saaty, T.L. How to make a decision: the analytic hierarchy process (1990a) (ISSN 03772217).
13. Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill, 1980, 287 p.
14. Tehrany, M.S., Pradhan, B., Jebur, M.N. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *J. Hydrol.*, **504** (2013), pp. 69-79, 10.1016/j.jhydrol.2013.09.034.