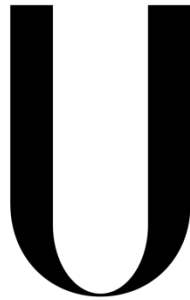


Universidade de Lisboa  
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

**Alteração do uso do solo e condições de escoamento na sub-bacia do rio de  
Loures**

**Francisco Maria Brandão e Vieira Mendes**

Dissertação de Mestrado orientada pelo Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques  
dos Reis e pelo Prof. Doutor Pedro Manuel Pinto dos Santos

Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território

2024

Universidade de Lisboa  
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Alteração do uso do solo e condições de escoamento na sub-bacia do rio de  
Loures**

**Francisco Maria Brandão e Vieira Mendes**

Dissertação de Mestrado orientada pelo Prof. Doutor Eusébio Joaquim Marques  
dos Reis e pelo Prof. Doutor Pedro Manuel Pinto dos Santos

Júri:

Presidente: Doutora Ângela Cristina Carvalho Silva Santos do Instituto de  
Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa

Vogais:

- Professor Doutor António Alberto Teixeira Gomes da Faculdade de Letras da  
Universidade do Porto
- Doutor Miguel Henrique Alfaia Leal do Centro de Estudos Geográficos do  
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa

2024

Eu Francisco Maria Brandão e Vieira Mendes, declaro que a presente dissertação de mestrado intitulada “*Alteração do uso do solo e condições de escoamento na sub-bacia do rio de Loures*”, é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas na bibliografia ou outras listagens de fontes documentais, tal como todas as citações diretas ou indiretas têm devida indicação ao longo do trabalho segundo as normas académicas.



*“A dream is like a river ever changing as it flows and a dreamer's just a vessel that must follow where it goes.”*

*- Garth Brooks*



## Agradecimentos

Durante esta caminhada, que durou mais dois anos, consegui realizar a minha dissertação, um sonho que me levou a suspender outros, mas que veio enriquecer a minha formação académica, profissional e pessoal. Muitas coisas aconteceram nestes dois anos, foram anos atípicos na vida de todos nós, e que me deram algumas tristezas, mas também alguns sorrisos, hoje posso dizer que sou um ser mais completo.

Este período foi recheado de várias aventuras profissionais que dificultaram a realização da dissertação, mas também de aventuras pessoais que me vieram enriquecer como pessoa. Quero agradecer a todos que estiveram comigo nesta fase, pois sem o seu apoio tudo seria mais difícil. Incentivaram-me a ser mais resiliente, a insistir, persistir e não desistir. Conseguindo assim, atingir o meu objetivo, a entrega desta dissertação.

Agradeço à minha família e em especial à minha mãe, por todo o Apoio que me deram, pela paciência e estarem sempre lá para mim, mesmo quando digo que não é preciso. Pelo amor e carinho que sempre me deram, pela coragem e vontade que me transmitiram.

Agradeço também à Catarina, por todos os dias ter-me ajudado a finalizar esta dissertação, com palavras sábias, por me encorajar a dar o melhor de mim, e sobretudo por me apoiar em todas as decisões tomadas ao longo desta caminhada.

Aos meus amigos por nunca me deixarem esquecer quem eu era, e por me fazerem acreditar sempre que era possível, mesmo quando o tempo para estarmos juntos era reduzido.

Aos meus treinadores que sempre incentivaram a minha formação académica e que apelavam para que desse tudo de mim em todas as esferas da minha vida, lembrando-me que o importante não é as vezes que caís, mas as que te levantas.

Aos meus professores, Eusébio Reis e Pedro Pinto Santos, por toda a paciência que tiveram ao longo destes dois anos, pelas sugestões, correções e rigor, que tiveram e deram-me ao longo de todo o desenvolvimento da presente dissertação.

Quero também dedicar a todos os que já não estão cá... Ao meu pai Luís e ao meu avô Hélio, que partiram precocemente, mas que recordo sempre a sua força e coragem mesmo em momentos tão adversos. Lembrando as palavras que o meu pai me escreveu no postal do meu oitavo aniversário (o último que passamos juntos) “tu irás apagar o que até então tinhas escrito no caderno da tua vida: inquietação, insegurança, medo. E irás escrever,

no lugar disto tudo, a palavra CORAGEM. Começando a jornada com esta palavra, e servindo com fé em deus, chegarás onde precisas...”. Levo todos os dias estas palavras comigo, OBRIGADO.

## Resumo

As alterações no uso do solo têm como consequência a substituição de áreas permeáveis para impermeáveis, aumentando o escoamento superficial na bacia hidrográfica. Estes episódios podem ter influência natural e humana, sendo esta última o ponto central deste trabalho, o qual tem como principal objetivo estudar as dinâmicas de alteração do uso e ocupação do solo ocorridas nos últimos 30 anos e a sua influência na ocorrência de cheias, na bacia hidrográfica do rio de Loures.

Durante o desenvolvimento do projeto foi essencial a modelação hidrológica com o programa HEC-HMS onde, a partir de cenários de precipitação intensa, e por meio de métodos cinemáticos, estimaram-se os caudais de ponta de cheia, considerando o impacto das dinâmicas territoriais na impermeabilização do solo, conseguindo assim aferir-se a sua influência no que toca à infiltração da água e escoamento superficial, com reflexo nos picos de cheia e nos caudais específicos.

Pela análise dos resultados obtidos através da modelação hidrológica, verificamos através dos hietogramas e hidrogramas de cheia, as perdas iniciais por infiltração, bem como os caudais de ponta de cheia e os caudais específicos de cada sub-bacia. Entre 1995 e 2018, a região que engloba a bacia do rio de Loures sofreu alterações significativas, no que toca ao uso e ocupação do solo, tendo-se verificado um aumento de 9,6 % de áreas artificializadas. Registou-se também o aumento de caudal específico na secção crítica meridional da bacia hidrográfica, na ordem dos 0,28 m<sup>3</sup>/s.

Tendo a situação deste local piorado, com o aumento significativo da artificialização, sobretudo em tecido urbano, durante o período de 1995 até 2018, conclui-se pela ocorrência do agravamento das condições de escoamento e, conseqüentemente pelo aumento da propensão para ocorrência de cheias na bacia hidrográfica do rio de Loures.

**Palavras-chave:** Cheias, Precipitação, Uso e ocupação do solo, Infiltração, Escoamento

## Abstract

Changes in land use result in the replacement of permeable areas with impervious ones, increasing the amount of surface runoff in the watershed. These episodes can have both natural and human influences, and human influence is the central point of this work, with the main objective being to study the dynamics of changes in land use and occupation that have occurred over the last 30 years and their influence on the occurrence of floods in the Loures river basin.

During the development of the project, hydrological modeling with the HEC-HMS software was essential. Using intense rainfall scenarios and kinematic methods, peak discharges were estimated, considering the impact of territorial dynamics on soil imperviousness, thus gauging their influence on water infiltration and surface runoff, with a reflection on peaks discharges and specific discharges.

By analyzing the results obtained from the hydrological modelling, we can verify the initial losses due to infiltration, as well as the peak discharges and the specific flows for each sub-basin through the hyetograms and flood hydrographs. Between 1995 and 2018, the region encompassing the Loures river basin underwent significant changes in terms of land use and occupation, there was a 9,6% increase in artificialized areas. There was also an increase in the specific flow in the critical southern section of the river basin, in the order of  $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ .

As the situation at this location has worsened, with a significant increase in impervious areas, especially in urban areas, during the period from 1995 to 2018, it is concluded that runoff conditions have worsened and, consequently, the possibility of flooding in the Loures river watershed has increased.

**Keywords:** Floods, Rainfall, Land cover, Infiltration, Runoff

## Índice

Agradecimentos .....	iv
Resumo .....	vi
Abstract .....	vii
Índice de figuras.....	x
Índice de tabelas .....	xii
Siglas e Acrónimos.....	xiv
Capítulo 1. <i>Introdução</i> .....	1
1.1 Contextualização da temática .....	1
1.1.1 Objetivos.....	2
1.1.2 Estrutura e organização da tese .....	2
1.2 Cheias rápidas e as suas contrariedades .....	3
1.3 O histórico das cheias na bacia hidrográfica do rio de Loures.....	5
1.4 Uso do solo e influência nas condições de escoamento .....	6
1.5 Métodos e técnicas de modelação hidrológica .....	7
Capítulo 2. <i>Enquadramento da área de estudo</i> .....	9
2.1 Dados utilizados .....	9
2.2 Enquadramento geográfico .....	10
2.3 Caracterização das condições de escoamento .....	13
2.3.1 Relevo.....	13
2.3.2 Forma e geometria da bacia.....	19
2.3.3 Litologia .....	21
2.3.4 Solos.....	26
2.3.5 Rede de drenagem.....	28
2.3.6 Uso e ocupação do solo .....	31
Capítulo 3. <i>Metodologia da modelação hidrológica</i> .....	35
3.1 Pré-processamento de dados com a extensão HEC-GeoHMS .....	35
3.2 Modelo de bacia em HEC-HMS.....	35
3.3 Dados de entrada no modelo meteorológico .....	37
3.4 Modelo meteorológico em HEC-HMS.....	39
Capítulo 4. <i>Resultados e discussão</i> .....	41
4.1 Evolução do uso e ocupação do solo .....	41
4.2 Modelação hidrológica com o programa HEC-HMS .....	47
Capítulo 5. <i>Considerações finais</i> .....	57
Bibliografia .....	61



## Índice de figuras

Figura 1 - Enquadramento geográfico da sub-bacia do rio de Loures na bacia hidrográfica do rio Trancão .....	11
Figura 2 - Sub-bacia do Rio de Loures com os principais cursos de água.....	12
Figura 3 - Distribuição espacial da altitude na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures .....	14
Figura 4 - Distribuição espacial do declive na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures.....	18
Figura 5 - Perfil Longitudinal do rio Loures .....	19
Figura 6 - Relação entre a permeabilidade do solo e subsolo e os caudais de ponta de cheia. Adaptado de Ramos (2008).....	23
Figura 7 - Litologia na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures (Fonte: elaborado a partir da Carta Geológica .....	25
Figura 8 - Tipos de Solos presentes na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures (Fonte: produzido através da Carta de Solos de Portugal, 1/25000, DGADR) .....	27
Figura 9 - Distribuição espacial do uso e ocupação do solo e das ocorrências de cheia da base de dados DISASTER. ....	32
Figura 10 - Modelo de Bacia.....	36
Figura 11 - Evolução do Uso e Ocupação do Solo .....	41
Figura 12 - Carta de Uso e Ocupação do Solo (1995) .....	43
Figura 13 - Carta de Uso e Ocupação do Solo (2007) .....	44
Figura 14 - Carta de Uso e Ocupação do Solo (2018) .....	46
Figura 15 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Rio de Loures 1 .....	47
Figura 16 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Ribeira de Pinheiro de Loures .....	48
Figura 17 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Ribeira de Odivelas .....	49
Figura 18 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Ribeira de Póvoa.....	50
Figura 19 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Rio de Loures 2.....	51
Figura 20 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Rio de Loures 3.....	52
Figura 21 - Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Rio da Costa .....	53
Figura 22 – Hidrograma de cheia no final do troço R290.....	55
Figura 23 – Hidrograma de cheia da zona R340 .....	56



## Índice de tabelas

Tabela 1 – Variáveis e fontes de dados utilizados .....	9
Tabela 2 - Área da sub-bacia hidrográfica do rio de Loures.....	11
Tabela 3 - Classes de declive na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures.....	17
Tabela 4 - Formações geológicas e classes litológicas existentes na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures .....	21
Tabela 5 - Tipos de Solo na Sub-bacia Hidrográfica do rio de Loures .....	28
Tabela 6 - Classificação hidrológica dos solos segundo o SCS (Adaptado de Lencastre e Franco, 1992).....	33
Tabela 7 - Definição das condições antecedentes de humidade no solo. (Adaptado de Correia 1984b). .....	34
Tabela 8 - Correspondência das Sub-bacias Finais com as Sub-bacias do HEC-HMS .....	36
Tabela 9 – Dados de Entrada das Sub-bacias em ambiente HEC-HMS.....	39
Tabela 10 – Dados de inserção do Modelo Meteorológico – Frequency Storm .....	40
Tabela 11 – Dados de entrada das sub-bacias método de Clark.....	40
Tabela 12 – Dados de área impermeabilizada em percentagem em 1995, 2007 e 2018.....	40
Tabela 13 – Matriz de características das sub-bacias hidrográficas estudadas .....	54
Tabela 14 – Dados hidrométricos da sub-bacia do rio de Loures (1995, 2007 e 2018).....	55



## **Siglas e Acrónimos**

**A** – Área

**AML-Norte** – Área Metropolitana de Lisboa Norte

**Amax** – Amplitude altimétrica

**CAOP** – Carta Administrativa Oficial de Portugal

**Cb** – Comprimento da Bacia

**CIGE** – Centro de Informação Geoespacial do Exército

**Cm** – Coeficiente de manutenção de Schumann

**CN** – Número de Escoamento

**Co** – Coeficiente orográfico de Fourier

**COS** – Carta de Uso e Ocupação do Solo

**Ct** – Comprimento total do curso de água

**Dd** – Densidade de Drenagem

**DGADR** – Direção Geral da Agricultura e Desenvolvimento Rural

**DGT** – Direção Geral do Território

**Dh** – Densidade Hídrica

**Ff** – Fator forma de Horton

**H** – Altitude média da bacia hidrográfica

**IDF** – Curvas Intensidade-Duração-Frequência

**INAG** – Instituto da Água

**Ir** – Índice de Rugosidade de Melton

**Kc** – Índice de Gravelius

**I** – Comprimento da saída da sub-bacia para dividir o caminho de drenagem

**Lm** – Largura média da Bacia hidrográfica

**LNEG** – Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia

**MDT** – Modelo Digital do Terreno

**N** – Número total de Cursos de Água Existentes

**p** – Perímetro da Bacia

**Rr** – Relação de relevo de Schumm

**Rib.<sup>a</sup>** – Ribeira

**SCS** – *Soil Conserveation Service*

**SIG** – Sistemas de informação geográfica

**SNIAmb** – Sistema Nacional de Informação de Ambiente

**Tc** – Tempo de Concentração

**Tr** – Tempo de Resposta

**USACE** – *United States Army Corps of Engineers*

**ZAC** – Zonas ameaçadas por cheias

# Capítulo 1. Introdução

## 1.1 Contextualização da temática

O comportamento hidrológico dos cursos de água depende, de uma maneira geral, das características físicas da bacia hidrográfica, sendo que nestas, as condições de infiltração são um exemplo de características físicas da bacia, sobre as quais observa-se a influência da ação humana, sobretudo em bacias de pequena dimensão. Segundo Reis (2006), “quanto menor forem as unidades hidrográficas, mais os fatores condicionantes irão adquirir uma maior homogeneidade e é mais evidente a sua relação com o comportamento fluvial”. Estas alterações rápidas dos caudais, podem provir quando há precipitações de grande intensidade, que irão provocar o transbordo dos cursos de água do seu leito e, conseqüentemente, originar uma cheia.

Uma cheia é um fenómeno hidrológico extremo, de frequência variável. Entende-se cheia, como “qualquer escoamento fluvial relativamente elevado que implica o transbordo das margens de um troço de um rio” (Wilson & Moore, 1998), por outras palavras, este fenómeno verifica-se quando o escoamento deste troço transborda as margens do seu leito normal. A sua origem pode ser natural, porém, pode também ser fortemente influenciado pela ação humana. Esta influência humana manifesta-se, sobretudo, em relação ao uso e ocupação do solo, a qual é responsável por parte das condições dinâmicas deste fenómeno potencialmente perigoso.

Desta forma, numa perspetiva geográfica, “as cheias são fenómenos naturais extremos e temporários, provocados por precipitações excessivas que fazem aumentar o caudal dos cursos de água, originando o extravase do leito menor e a inundaçãõ das margens e áreas circunvizinhas, que se encontram frequentemente ocupadas por atividades humanas.” (Zêzere *et al.*, 2005).

A motivação para a escolha da temática das cheias para a presente dissertação, foi o facto de ter desenvolvido bastante interesse nesta área ao longo do meu percurso académico, por envolver componentes físicas (hidrologia, geomorfologia, geologia, etc.), por ser um tema que engloba a possível influência dos instrumentos de ordenamento do território sobre este fenómeno perigoso.

### **1.1.1 Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho consiste na análise das variações espaciais e temporais das condições que se repercutem nas cheias, que decorrem das dinâmicas de alteração de uso e ocupação do solo, na sub-bacia do rio de Loures, sendo que, esta tem vindo a sofrer alterações bastante significativas nos últimos 30 anos, no que concerne ao uso e ocupação do solo. Para tal, realizar-se-á um estudo das condições de escoamento da bacia hidrográfica que tenham algum tipo de influência nas cheias, através da caracterização dos fatores de escoamento da bacia. Pretende-se perceber como o fator de artificialização do território varia nos vários momentos a estudar (entre 1995 e 2018), tendo por base a variação do uso e ocupação do solo e a construção de infraestruturas que afetam o escoamento.

Pretende-se também conhecer os caudais, obtidos por métodos cinemáticos para cada um dos momentos anteriormente referidos, e nos setores onde se constate maior risco de afetação de infraestruturas e atividades das populações, por parte das cheias.

Posto isto, ir-se-á verificar como cada uma das alterações da ocupação do solo se traduz nas diversas componentes do escoamento fluvial ou com influência indireta nas cheias.

### **1.1.2 Estrutura e organização da tese**

A nível da estrutura, a presente dissertação é composta por três partes. A primeira parte inclui os Capítulos 1 e 2; no primeiro realiza-se uma contextualização das cheias e o tipo de abordagem que se vai utilizar nesta dissertação, bem como a abordagem do histórico de cheias que decorreram na área de estudo e métodos e técnicas da modelação hidrológica. No segundo capítulo, é realizado um enquadramento da área de estudo, com caracterização das condições de escoamento mais pormenorizada da área em estudo, fazendo uma breve análise das características litológicas, da hidrografia, dos solos, do relevo e do uso e ocupação do solo nos períodos 1995, 2007 e 2018, abordando as suas dinâmicas de alterações, como o uso e ocupação do solo pode afetar o escoamento e como é classificado em Portugal.

A segunda parte será composta pela modelação hidrológica, onde abordamos o capítulo 3 da metodologia, é aqui que é realizado o pré-processamento dos dados através do HEC-GeoHMS, é concebido o modelo de sub-bacia, serão calculados através de métodos cinemáticos, os caudais de ponta de cheia, bem como a conceção do modelo meteorológico, para simular os eventos de precipitação intensa onde se irá avaliar como o uso e ocupação influenciam no tempo de resposta da bacia hidrográfica, com recurso ao programa HEC-HMS.

Na terceira Parte realizar-se-á a discussão de resultados obtidos, onde é feita a análise pormenorizada da evolução do uso e ocupação do solo para os três períodos de estudo da bacia hidrográfica. Serão feitas as análises hidrogramas de cheia e hietogramas, de forma a perceber como evoluíram os caudais de ponta de cheia e caudais específicos e a capacidade de resposta das diferentes bacias hidrográficas e com diferentes usos do solo (1995, 2007 e 2018).

## **1.2 Cheias rápidas e as suas contrariedades**

Em primeiro lugar, é necessário fazer a distinção entre inundação e cheia, visto que, apesar destes termos serem próximos, não têm o mesmo significado. “As cheias provocam inundações, mas nem todas as inundações são devidas às cheias.” (Ramos, 2005). Desta forma, uma cheia ocorre quando a água do rio ou ribeira transborda do seu leito normal e inunda as áreas ao redor do leito, na denominada planície de inundação ou leito maior. As inundações não têm apenas origem fluvial, podendo ser urbanas, quando ocorrem em meio urbano, normalmente em pequenas bacias, após chuvas intensas e em terrenos com grande grau de impermeabilização, em consequência das construções, agravados por sistemas de águas residuais e pluviais insuficientemente dimensionados. Também podem ocorrer por galgamentos oceânicos da linha de costa em situações de tempestade (Ramos, 2005).

Mesmo nos dias que decorrem, é difícil ainda perceber e prever a ocorrência de uma inundação/cheia – principalmente as cheias rápidas –, sobretudo pela capacidade reduzida de prever a ocorrência de chuvas de grande intensidade em curtos períodos de tempo (Ramos & Reis, 2001). Contudo, é possível prever as dinâmicas do uso do solo e da expansão dos aglomerados populacionais que possam estar localizados em zonas de maior perigosidade e vulnerabilidade, estando assim mais expostas (Santos, 2015).

Pelas características da área de estudo do presente trabalho, o tipo de cheias que serão abordadas são as cheias rápidas. É este o tipo de cheia que afeta a área de estudo selecionada - sub-bacia do rio de Loures, na Área Metropolitana de Lisboa -, por ter uma pequena dimensão e tempos de concentração relativamente curtos (Lúcio, 2014).

O fator desencadeante para as cheias rápidas são as precipitações intensas. Para a melhor compreensão deste fator, devem-se considerar os valores críticos para chuvadas com duração igual ao tempo de concentração da bacia (Lúcio, 2014). Os valores utilizados neste caso são os da curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência), obtidos a partir da análise reportada no relatório de Brandão *et al.* (2001), onde temos os valores do período de retorno

de 100 anos na estação de São Julião do Tojal, sendo esta a estação ativa mais próxima da bacia hidrográfica em estudo. Estas curvas, estabelecem a relação da intensidade com a duração, juntamente com o período de retorno de uma chuvada (Brandão *et al.*, 2001).

Ao nível do quadro legal relativo ao processo de avaliação e gestão do risco de cheias, a diretiva comunitária da União Europeia, sobre a avaliação e gestão dos riscos de inundações, aprovada em 2007 (Diretiva Europeia 2007/60/CE), é um documento fundamental, tal como o Decreto-Lei nº 115/2010 de 22 de outubro, que estabelece a transposição para a realidade portuguesa. Nela se estabeleceu um novo quadro comum comunitário para a gestão e avaliação de risco de inundações. E segundo esta, na alínea 1 do artigo 2.º, uma inundação é nada mais que “a cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água” (EU, 2007). Esta definição de inundações inclui também as cheias que provenham de origem pluvial. Existem vários tipos de inundações, tendo estas diversas origens em toda a comunidade, sendo que, segundo a diretiva comunitária da União Europeia, existem as cheias de origem fluvial, cheias repentinas/rápidas, inundações urbanas e inundações marítimas em zonas costeiras (EU, 2007; Ramos, 2008).

Posto isto, segundo Ramos (2008), há quatro tipos de inundações, dependendo da sua origem: inundação fluvial, inundação costeira, inundação urbana e inundação de depressão topográfica. As que se irão ser abordadas, são as inundações fluviais que decorrem das cheias, que se dividem em nove tipos, contudo neste trabalho a abordagem é nas cheias rápidas decorrentes de um episódio de precipitação intensa.

De uma maneira geral, as bacias hidrográficas de pequena dimensão, têm menores tempos de concentração, e rapidamente atingem o seu pico de caudal em poucas horas ou minutos, durante precipitações intensas. Entenda-se como tempo de concentração ( $T_c$ ), a duração de tempo que a água leva a percorrer a distância entre o ponto mais a montante até ao ponto mais a jusante considerado, numa bacia hidrográfica (Chow *et al.*, 1988). Contudo, em bacias hidrográficas pequenas a médias, mas também em grandes bacias, o seu comportamento hidrológico pode variar por mudanças morfológicas, litológicas e de uso e ocupação do solo. Sendo que, este último tipo de mudanças é o que irá ser estudado ao longo desta dissertação.

Posto isto, consegue-se perceber que a temática das cheias e inundações e a sua avaliação, englobam diversos conhecimentos de outras áreas, que ajudam a compreender e modelar, diretamente ou indiretamente, o processo de cheia. Sendo as ciências de natureza mais física fundamentais para a compreensão dos processos hidrodinâmicos de cheia, aquelas não são suficientes para a compreensão de todos os processos que constroem o

risco e, conseqüentemente, para alcançar soluções eficientes de redução e mitigação dos impactos das cheias. Para tal, é necessária uma abordagem transdisciplinar que combine ciências sociais e ciências de natureza física (Di Baldassarre *et al.*, 2013; Mazzoleni *et al.*, 2021). Ou seja, a temática das cheias e inundações é explicada parcialmente pela intervenção humana e são necessárias resoluções não só em diferentes níveis, como também, em diferentes escalas temporais (Merz *et al.*, 2010).

### **1.3 O histórico das cheias na bacia hidrográfica do rio de Loures**

A área de estudo da presente dissertação foi escolhida pela sua propensão para a ocorrência de cheias, onde no passado ocorreram grandes cheias. Desta forma, apresenta-se a informação das ocorrências de cheias na bacia, com recurso à base de dados DISASTER (Zêzere *et al.*, 2014).

Dos vários episódios de cheia que decorreram nesta bacia nos últimos 100 anos, destacam-se as que decorreram nos anos de 1967, 1983 e 2008 (apenas ir-se-á abordar estas três, para que haja um conhecimento da área a nível de ocorrências de grandes cheias), devido aos danos causados pelas mesmas, tanto a nível material como a nível humano (Leal, 2011; Trigo *et al.*, 2016).

Abordando a primeira, em novembro de 1967, esta teve um grande destaque em Portugal, como uma das maiores cheias que ocorreram no país. Este episódio foi marcado pelo elevado número de mortos, foi bastante devastadora, pois ocorreu em locais com grande densidade populacional e contextos de elevada vulnerabilidade, quer dos edifícios, quer da população residente. A grande causa deste fenómeno, foi uma queda de precipitação bastante intensa, nas áreas de periferia de Lisboa.

*“On the night of 25 November 1967 and early morning hours of the following day, the Lisbon area suffered the deadliest natural hazard since the ill-famed 1755 earthquake. (...) Based on the sub-daily time series of a representative station, and its IDF curves, we have found that the exceptionality of this rainfall event is particularly linked to rainfall intensities ranging in duration from 4 to 9 h.”* (Trigo *et al.*, 2016)

Segundo o artigo acima mencionado, neste episódio ocorreram mais de 500 mortes e muitas mais habitantes desalojados, feridos, evacuados e desaparecidos em torno da área metropolitana onde está incluída a área de estudo.

O segundo episódio de cheia decorreu no ano de 1983, após um período de chuvas intensas, que se iniciou a 18 de novembro e terminou apenas no dia seguinte. Este evento pluviométrico afetou, comparativamente ao evento de 1967, uma área menor, mas também sendo menos desastroso e danoso, uma vez que, após as cheias de 1967 verificou-se uma redução da vulnerabilidade, que ocorre pela remoção dos bairros clandestinos presentes na região e obstáculos ao escoamento, bem como pela aprovação de legislação que implementam regras de ocupação do território que combatem estes impactos ( Lima & Faísca, 1994; Catarina Ramos & Reis, 2001; Leal, 2011).

Por último, o episódio de cheia de 2008, caracterizou-se pelo extravaso de vários cursos de água localizados na bacia hidrográfica do rio de Loures, causando inundações que afetaram caves e pisos térreos de edifícios, bem como viaturas e mobiliário urbano, devido a arrastamento das águas pelo escoamento superficial, bem como, o encerramento de vias de acesso, por se encontrarem submersas e pela derrocada de muros. Sendo que, estes danos ocorreram na sequência de um evento de precipitação com curtos períodos intensos intercalados por aguaceiros menos intenso, seguido novamente por fortes precipitações intensas (Fragoso *et al.*, 2010). Além dos danos materiais, a nível humano, registaram-se três mortes por afogamento, sendo apenas uma na área de estudo, em Ponte de Frielas (ANPC, 2008).

#### **1.4 Uso do solo e influência nas condições de escoamento**

As alterações no uso e ocupação do solo são o resultado da interação das forças motrizes políticas/institucionais, económicas, culturais, tecnológicas e naturais/espaciais (Hersperger & Bürgi, 2010). Até ao momento, a ciência das alterações do uso do solo tem dedicado pouca atenção à política de planeamento e gestão do território nas paisagens urbanas, apesar da premissa, muito aceite de que o planeamento afeta o tipo de alterações do uso do solo. Isto deve-se principalmente à escassez de dados que sejam relevantes e do entendimento teórico acerca do impacto do ordenamento do território na mudança do solo urbano (Hersperger *et al.*, 2018).

Relembrando o que foi dito anteriormente, a diretiva “Inundações” (diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia) considera que “as inundações são um fenómeno natural que não pode ser evitado. No entanto, determinadas atividades humanas (como o aumento das aglomerações humanas (...) e a redução da retenção natural de água devido à utilização do solo) (...) contribuem para um aumento da probabilidade de ocorrência de inundações e do respetivo impacto negativo” (Parlamento Europeu e do

Conselho, 2007). Desta forma, pode-se afirmar que o uso e a ocupação do solo nas áreas de cabeceira e nas vertentes, assim como junto aos leitos dos cursos de água, pode alterar de forma prejudicial as condições de escoamento, provocando cheias em algumas situações. Neste trabalho pretende-se analisar e compreender, como é que as alterações do uso do solo ao longo do tempo foram modificando o comportamento hidrológico e as dinâmicas de escoamento, bem como a ocorrência de cheias, na bacia hidrográfica do rio de Loures.

No caso das cheias rápidas em áreas urbanas, a magnitude da cheia após precipitações intensas de curta duração depende amplamente da percentagem de área artificializada, sobretudo quando isso se traduz em maior impermeabilização. Esta impermeabilização dos solos, faz com que a infiltração seja menor e, conseqüentemente um maior escoamento superficial direto, não só na quantidade em si, em termos de volume de água, mas também na velocidade da mesma, por não existirem tantos obstáculos, e pelos materiais que compõem as áreas artificializadas terem menos rugosidade. Isto leva a que as bacias hidrográficas com maior percentagem de área artificializada tenham tempos de concentração e de resposta mais reduzidos (Leal, 2019).

Em Portugal a tendência nos últimos anos tem sido um aumento das áreas urbanas e uma redução das áreas florestais, dando origem ao aumento de artificialização do terreno, diminuindo conseqüentemente a capacidade de infiltração, que aumenta o escoamento superficial. Além da artificialização, é marcada essencialmente pelo crescimento urbano, que caracteriza o complexo sistema urbano da Península Ibérica e nomeadamente em Portugal. Esta ocupação do solo exerce uma grande pressão sobre os ecossistemas do território podem causar problemas na sustentabilidade do mesmo, promovendo uma degradação dos solos e de outros recursos naturais. (Meneses *et al.*, 2017).

## **1.5 Métodos e técnicas de modelação hidrológica**

A modelação hidrológica baseia-se numa representação da realidade através de um modelo, que pode ser visto como uma representação matemática do escoamento de uma certa porção do território, geralmente definida de acordo com critérios hidrográficos, como uma bacia ou sub-bacia hidrográfica (Jha *et al.*, 2012; Leal, 2019b). O principal resultado de um modelo hidrológico é a simulação do caudal em determinadas secções fluviais, em resposta a determinadas condições de precipitação e de infiltração na bacia hidrográfica.

De uma forma sucinta, um modelo hidrológico é mais eficiente, quanto melhores forem os dados utilizados, no que toca a topografia e à permeabilidade, ou seja, quanto mais

próximos da realidade melhor. Contudo, não existe nenhum modelo que apresente sempre os melhores resultados nos diferentes contextos. Assim, utiliza-se o método que seja mais adequado a cada situação mediante as suas características (Leal, 2019; P. P. Santos *et al.*, 2011).

Geralmente acoplados a modelos hidrológicos, utilizam-se modelos hidráulicos de forma a simular o comportamento hidrodinâmico do escoamento num dado leito de inundação e assim obter a expressão da área inundável, para eventos concretos ou para determinados períodos de retorno, recorrendo a hidrogramas de cheia. Estes modelos conseguem também refletir alterações no uso e ocupação do solo e alterações morfológicas no leito do rio, permitindo a realização de simulações, através da alteração dos parâmetros inseridos no modelo, como por exemplo, os coeficientes de rugosidade associados aos tipos de ocupação.

Este tipo de modelos hidráulicos, permite ainda avaliar a reação do escoamento à inclusão de obstáculos nos leitos fluviais, não sendo obstante o tipo de método selecionado para o estudo em causa, os resultados cartográficos atingidos e a sua credibilidade estão dependentes da qualidade de resolução dos dados de base usados, bem como da adaptação realizada para a realidade e os métodos e técnicas aplicados para a produção de mapas (Merz *et al.*, 2007; Neal *et al.*, 2012).

No caso do presente trabalho, irá realizar-se modelação hidrológica procedendo-se à alteração dos valores da área impermeabilizada ao longo da bacia e do leito (Santos, 2009).

## Capítulo 2. Enquadramento da área de estudo

### 2.1 Dados utilizados

Primeiramente, procedeu-se ao levantamento da informação necessária e disponível, relativa à sub-bacia do rio de Loures, para que se tenha um melhor conhecimento do território em termos da hidrografia, de relevo e do uso e ocupação do solo (tabela 1).

Tabela 1 – Variáveis e fontes de dados utilizados

Metadados				
Nome		Escala/Resolução	Tipo	Fonte
CAOP 2019		1:25000	Shapefile	DGT
COS (1995 a 2018)		1:25000	Shapefile	DGT
Carta Geológica	Folha 34B	1:50000	Shapefile	LNEG
		1:50000	JPEG	LNEG
Carta de Solos		1:25000	Shapefile	DGADR
Altimetria	Pontos Cotados	1:25000	Shapefile	CIGeoE
	Curvas de Nível	1:25000	Shapefile	CIGeoE
Hidrografia		1:25000	Shapefile	CIGeoE
Curve Number (a partir de Corine Land Cover 2000)		Diversas Escalas / 500 m	Raster	SNIAmb

Para o cumprimento do primeiro objetivo secundário, através da informação antes referida, serão utilizadas, em ambiente SIG, temas das cartografias acima referidas, através do *software* ArcGIS, de forma a poder realizar um estudo das condições de drenagem. Para tal, é necessária uma caracterização das componentes biofísicas (formações geológicas, solos, relevo, uso e ocupação do solo e hidrografia) e também a caracterização das condições de escoamento da sub-bacia do rio de Loures.

De forma a estudar as componentes biofísicas da sub-bacia, a nível do relevo, serão utilizados dados da altimetria (curvas de nível e pontos cotados), obtidos através da Carta Militar de Portugal, 1:25 000, fls. 416, 417 e 431, e da hidrografia, na escala 1:25 000, de forma a poder estudar a elevação do território, os seus declives, a rede de drenagem (hierarquia, escoamento, etc.). Quanto aos solos, vai-se recorrer à carta complementar de solos 1:25 000, da DGADR em formato digital e para as formações geológicas e litologia, o

estudo é realizado com recurso à Carta Geológica de Portugal, à escala 1:25 000, e a nota explicativa da mesma cartografia na escala 1:50 000, folha 34B-Loures, do LNEG.

No que diz respeito às variáveis antrópicas, utilizou-se também a Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS), de escala 1:25 000, da Direção Geral do Território (DGT), para os vários períodos temporais (1995, 2007, 2010, 2015, 2018), de forma a realizar a análise dos diferentes usos e ocupações de solo nos últimos 30 anos na bacia hidrográfica em estudo. Contudo, durante o desenvolvimento do projeto, optou-se apenas por utilizar os anos de 1995, 2007 e 2018. Esta opção deve-se ao facto de não se registarem alterações significativas, sobretudo nos territórios artificializados, de 2007 para 2010 e de 2015 para 2018.

Para o *Curve Number* (CN) do tipo AMCII, utilizou-se a informação *raster* do Sistema Nacional de Informação de Ambiente (SNIAmb). O CN foi tido em conta para o modelo meteorológico, que mais à frente irá ser explicado, utilizado como fator no método de estimação de caudais de ponta de cheia do *Soil Conservation Service*.

## 2.2 Enquadramento geográfico

A área em estudo desta dissertação é a sub-bacia hidrográfica do rio de Loures, que é nada mais que uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Trancão, que pertence à Área Metropolitana Norte de Lisboa (AML-Norte), enquadrada na região hidrográfica do Tejo (RH5-Tejo). A bacia hidrográfica do rio Trancão possui uma área de 293 km<sup>2</sup>.

O rio Trancão tem aproximadamente 29 km de extensão, localizando-se a sua nascente na Póvoa da Galega, concelho de Mafra. O rio Trancão é um afluente direito do rio Tejo, desaguando para o estuário, em Sacavém. Como afluentes principais, tem o rio de Loures (aquele em estudo na presente dissertação), a ribeira das Romeiras, a ribeira do Prior Velho e a ribeira do Mocho.

De forma a conhecer devidamente o território que foi escolhido, é necessário caracterizar sucintamente a bacia hidrográfica que está inserida na área em estudo. A sub-bacia do rio de Loures, encontra-se na margem esquerda da bacia hidrográfica do rio Trancão e têm uma área de aproximadamente de 124,71 km<sup>2</sup>, abrangendo 6 concelhos (Figura 1).

Atendendo àquela figura e à tabela 2, observa-se que 34,83 % da área da área em estudo consiste na sub-bacia do Rio de Loures 1, que drena uma parte significativa do setor setentrional do rio de Loures. É naquela sub-bacia que se encontra o ponto mais alto da bacia hidrográfica em estudo. Por fim, 24,07 % da área de estudo é a sub-bacia da ribeira de

Pinheiro de Loures, que à semelhança da anterior, é a sub-bacia com maior área e com altitudes elevadas, as restantes bacias perfazem 41 % da área de estudo (tabela 2).

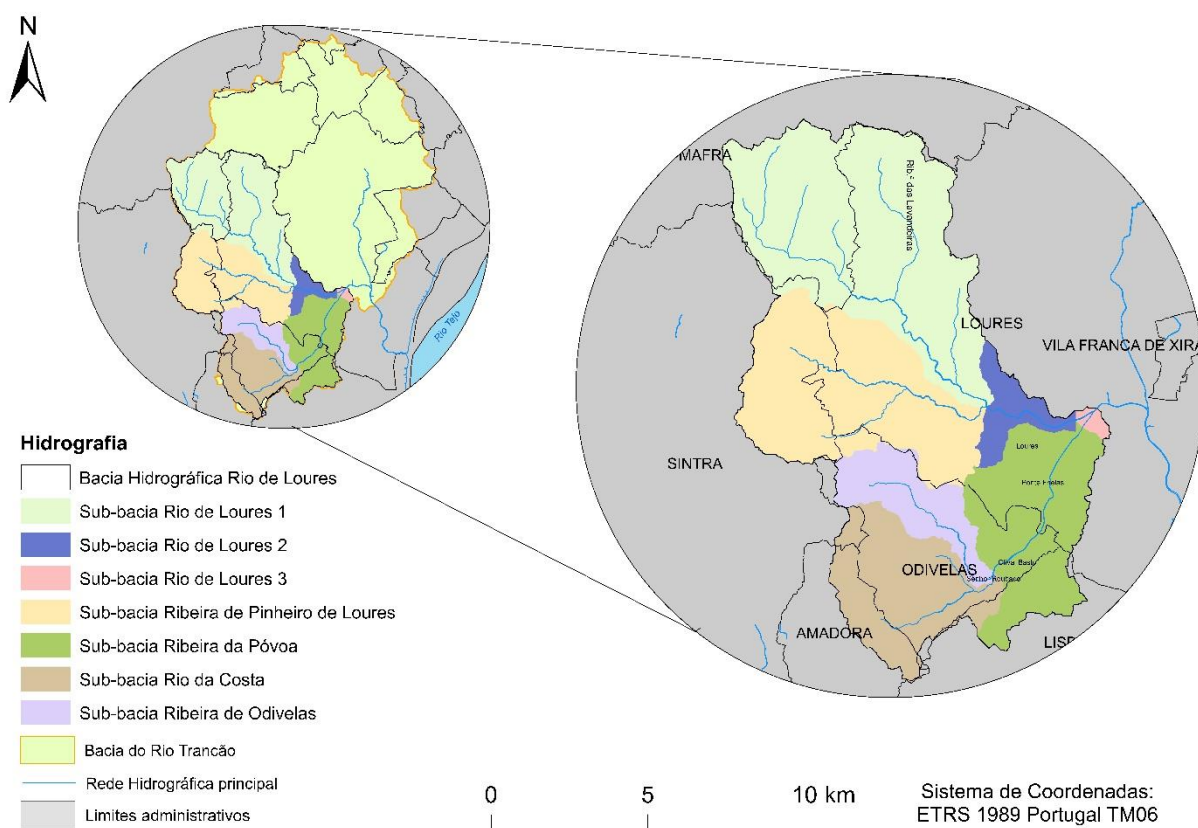


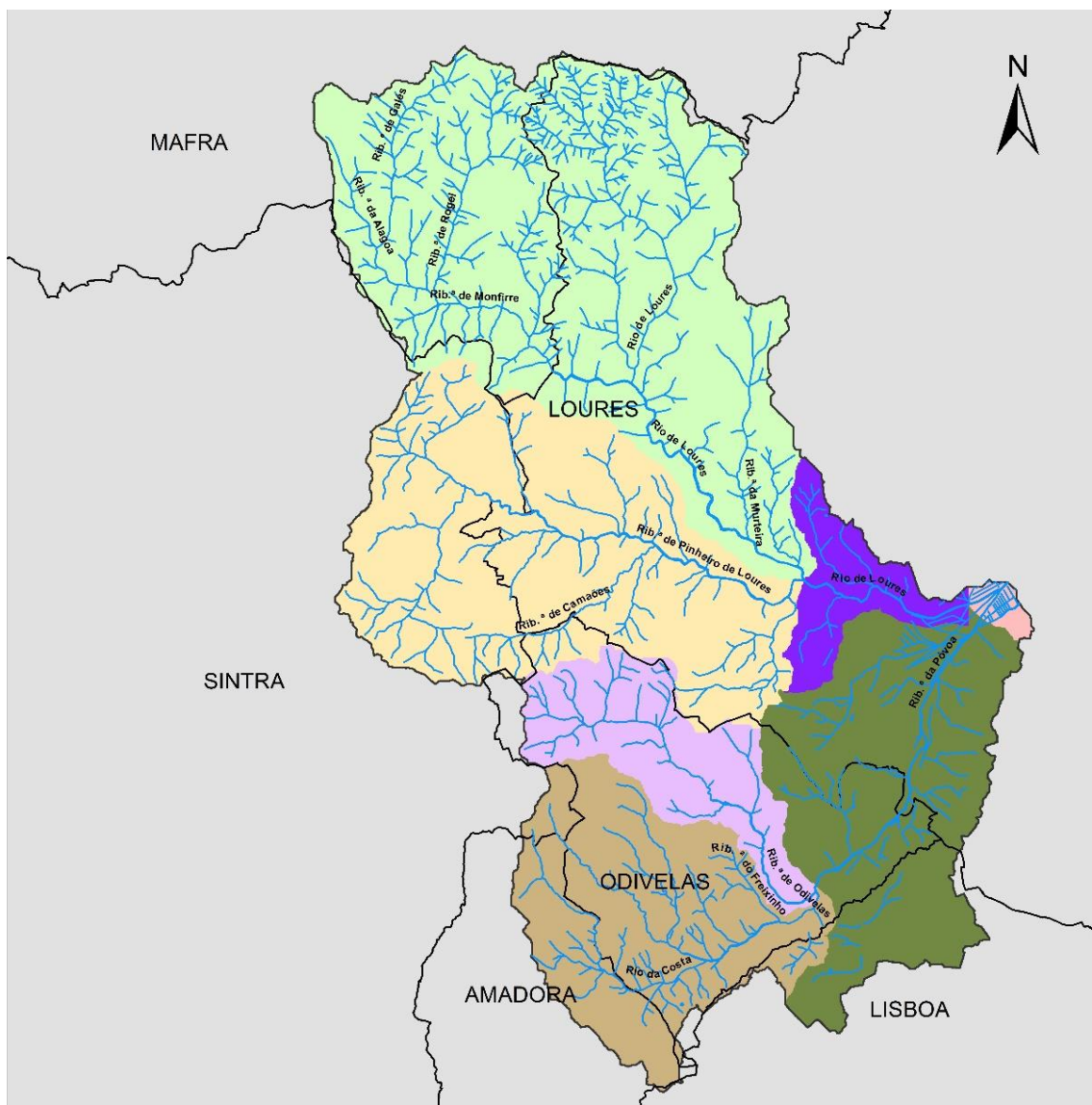
Figura 1 - Enquadramento geográfico da sub-bacia do rio de Loures na bacia hidrográfica do rio Trancão

Tabela 2 - Área da sub-bacia hidrográfica do rio de Loures

Sub-bacias	Área da Bacia (km <sup>2</sup> )	Área da Bacia (%)
Rio de Loures 1	43,44	34,83
Ribeira de Pinheiro de Loures	30,02	24,07
Rio da Costa	19,85	13,78
Ribeira de Odivelas	17,18	7,26
Ribeira da Póvoa	9,06	15,92
Rio de Loures 2	4,52	3,62
Rio de Loures 3	0,69	0,55
<i>Sub-bacia do rio de Loures</i>	<i>124,71</i>	<i>100,00</i>

O rio de Loures, é um pequeno curso de água português do concelho de Loures, que nasce a Norte da freguesia de Lousa e desagua em Unhos na margem direita do Trancão. Este rio tem como principais afluentes da margem direita, a Ribeira de Alagoa, a Ribeira de Galés, a Ribeira de Rogel, a Ribeira de Lavadeiras, a Ribeira de Monfirre, a Ribeira de

Pinheiro de Loures, a Ribeira de Camarões, a Ribeira de Odivelas, a Ribeira do Freixinho, o Rio da costa e a Ribeira da Póvoa. Já da sua margem esquerda, na área de estudo, apenas conta com a Ribeira de Murteira.



### Hidrografia



Figura 2 - Sub-bacia do Rio de Loures com os principais cursos de água

É importante salientar que o ponto de junção das sub-bacias da ribeira de Pinheiro de Loures e do Rio de Loures 1 e 2, juntamente com a sub-bacia da ribeira da Póvoa, poderá ser um ponto crítico quanto à ocorrência de cheias por se juntarem vários cursos de água com grande acumulação.

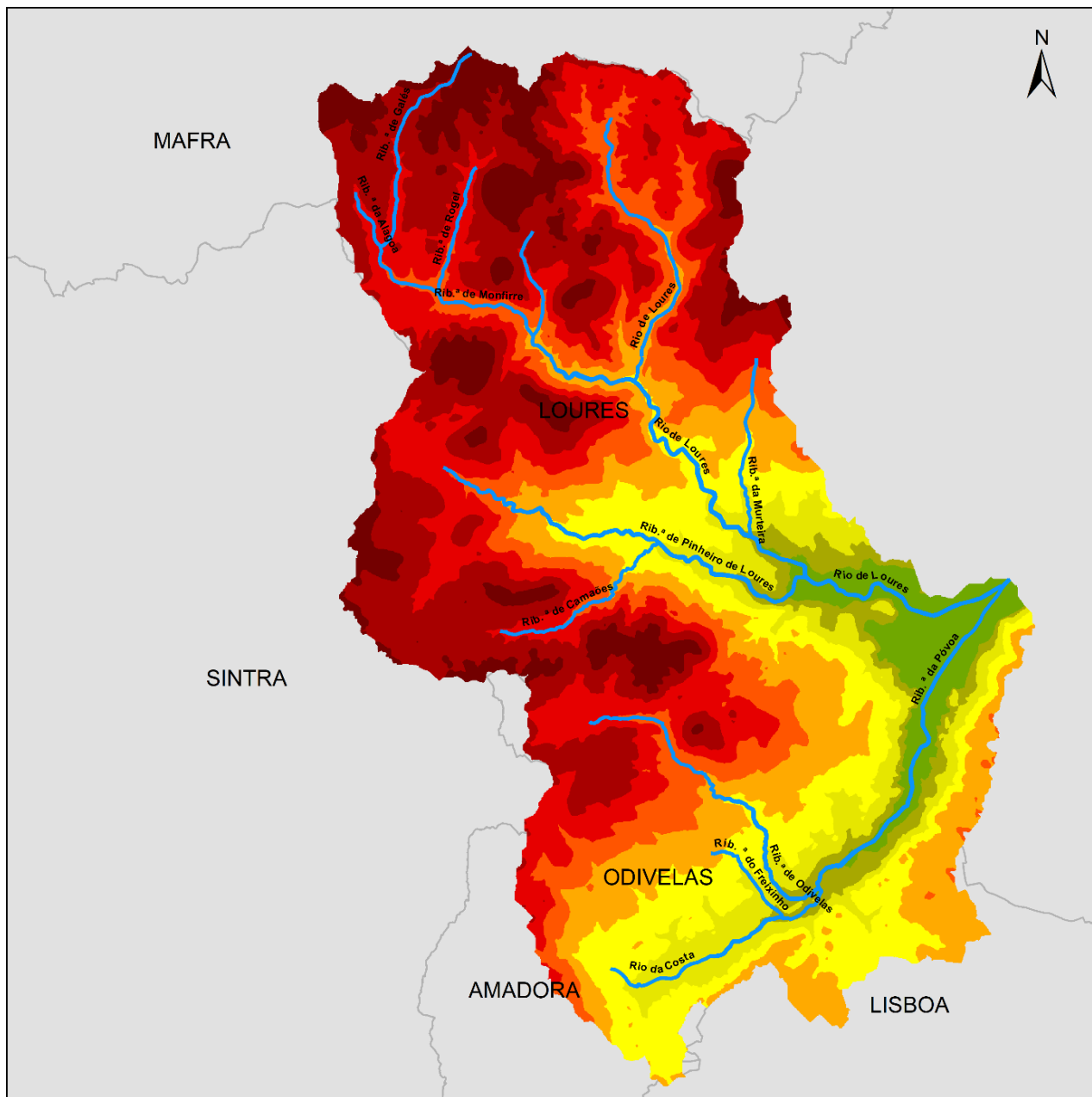
## **2.3 Caracterização das condições de escoamento**

### **2.3.1 Relevô**

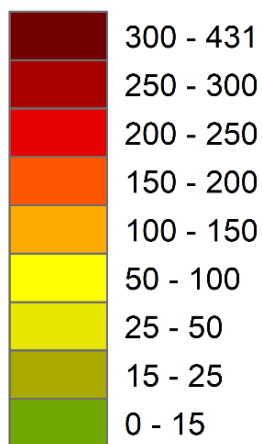
O relevo tem influência no comportamento e características das inundações numa bacia hidrográfica, sendo que os seus elementos mais relevantes são a altitude, o desnível/amplitude, o declive e outros índices morfométricos que exprimem a rugosidade morfológica (Leal, 2019; Ramos, 2008).

O relevo da sub-bacia hidrográfica do rio de Loures é mais acidentado no norte/noroeste da bacia do que no sul/este da bacia, sendo em especial acidentado a noroeste, onde se encontram os pontos mais elevados da área de estudo, acima de 400 m.

A paisagem é fortemente modelada nos eixos sudeste-este e noroeste-este pelos vales dos dois cursos de água mais importantes: o rio de Loures e a Ribeira da Póvoa. A sul, nas margens do rio da Costa e da ribeira da Póvoa, existe uma extensa área plana, para a qual os cursos de água escoam quase na sua totalidade, neste setor. Entre o ponto mais baixo da bacia e o ponto mais alto existe um desnível de 421 m, correspondendo este valor à amplitude altimétrica. O ponto mais elevado encontra-se no planalto de Montemuro, na região setentrional da bacia, com 430,8 m, e o mais baixo perto da várzea de Loures, com 9 m (figura 3).

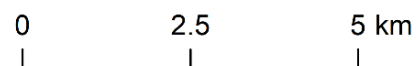


**Altitude (m)**



— Rede Hidrográfica Principal

— Limites Administrativos



Sistema de Coordenadas:  
ETRS 1989 Portugal TM06

Figura 3 - Distribuição espacial da altitude na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures

Através do *software* ArcGIS, procederam-se a alguns cálculos estatísticos sobre o relevo na área de estudo, tendo sido aplicadas as equações 1 e 2, em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A altura média da bacia ( $Z_m$ ) é 165,1 m e o valor da altitude média ( $H_m$ ) é 172,1 m. Estes dois indicadores diferem em alguns casos, pois a altura média considera, como referência, a altitude da desembocadura, contrariamente à altitude média, que considera como referência o nível médio das águas do mar, podendo estas serem expressas pelas seguintes equações:

$$Z_m = \frac{\sum Z_i \times A_i}{A} \quad (1)$$

$$H_m = Z_m - Z_0 \quad (2)$$

A amplitude altimétrica, ou amplitude média da bacia, é um indicador correspondente à diferença entre a altitude do ponto mais elevado da bacia e a desembocadura desta. Na área de estudo, este valor é 430,79 m pois a altitude do ponto mais elevado da bacia é 430,79 m e a altitude da desembocadura é 9 m.

Outro indicador de relevo é o Coeficiente Orográfico de *Fourier* ( $Co$ ), expresso na Eq. 3, que relaciona a altura média da bacia ( $H$ ) com a sua área ( $A$ ), portanto, comparando a preponderância sobre a energia potencial da água e a influência sobre o escoamento superficial. Um coeficiente orográfico superior ou inferior a 6 é marca de um relevo acentuado ou pouco acentuado, respetivamente (Ramos, 2008). Com um coeficiente orográfico igual a 237,4, pode-se afirmar que a bacia hidrográfica do rio de Loures tem um relevo acentuado.

$$Co = \frac{H^2}{A} \quad (3)$$

$$Co = \frac{172,07^2}{124,71}$$

$$Co = 237,42$$

A Relação de Relevo de *Schumm* ( $Rr$ ) é um índice orográfico indicativo da velocidade do escoamento, sendo que quanto maior é este valor, mais rápido será o escoamento de uma bacia hidrográfica, ou seja, com maior rapidez se processa a chegada das águas da bacia à desembocadura. Este indicador (Eq. 4) consiste no quociente entre a amplitude altimétrica da bacia ( $\Delta m_{\text{máx}}$ ), em metros, e o comprimento da bacia ( $Cb$ ), em metros (Ramos, 2008). Sendo, para a área de estudo:

$$Rr = \frac{\Delta m_{\text{máx}}}{Cb} \quad (4)$$

$$Rr = \frac{430,793}{14,524}$$

$$Rr = 29,66$$

O Índice de Rugosidade de Melton ( $I_r$ ) é outro índice que expressa o declive da bacia e, por isso, este é tanto maior quanto mais declivosa for a área em estudo. Este indicador utiliza a amplitude altimétrica ( $\Delta m_{\text{máx}}$ ) e o valor da densidade de drenagem ( $Dd$ ), representado pela Eq. 5. Para a sub-bacia hidrográfica do rio de Loures, este valor é de 1344,074 (Ramos, 2008).

$$I_r = \Delta m_{\text{máx}} \times Dd \quad (5)$$

$$I_r = 430,793 \times 3,12$$

$$I_r = 1344,074$$

O declive influencia a localização de inundações fluviais, interferindo com o comportamento dos cursos de água e com as características do regime fluvial (Smith & Ward, 1999). Segundo Ramos (2008), o declive interfere na velocidade de escoamento e na infiltração (quanto maior ele for, maior será a velocidade e menor a infiltração), interferindo também na intensidade da erosão hídrica e fluvial, tendo consequências na carga sólida transportada durante as cheias e, em consequência, no seu poder destruidor (Ramos, 2008). E considerando cada elemento geomorfológico, com exceção da própria área de acumulação, o declive é o que representa uma maior supremacia em situações de cheias, por ser um dos maiores fatores se não mesmo o maior fator de escoamento (Leal, 2011).

Assim, quanto maior a inclinação da bacia e dos canais fluviais, maior será a velocidade, menor o percurso sobre as vertentes e menor a infiltração, o que se traduz por maiores valores de escoamento a afluir a uma determinada secção a jusante, e em menor tempo. Tendo consequentemente uma infiltração deficiente pelo facto do tempo que a água demora a concentrar-se nos leitos fluviais, havendo um aumento dos caudais de ponta de cheia (Ramos, 2008; Leal, 2011). Em conclusão, o declive tem influência na velocidade de escoamento e na infiltração.

Uma bacia hidrográfica mais declivosa é normalmente mais erodida, causando uma maior deposição de sedimentos a jusante. Esta deposição aumenta a altitude em que as margens do rio se encontram fazendo com que, quando existe um episódio de cheia, esta chegue a um setor mais elevado. Por norma, estes tipos de bacias são mais vulneráveis à

ocorrência de inundações fluviais, devido a favorecerem o aumento da velocidade da progressão da onda de cheia e da sua capacidade de transporte da carga sólida (Ramos, 2008).

Na figura 4, encontra-se o mapa de declives da bacia hidrográfica do rio de Loures. Como mencionado anteriormente, as áreas onde existe maior declive situam-se na parte Norte da bacia e nos vales do rio de Loures, onde atingem valores máximos de declive na ordem dos 60.89°.

Os setores de elevado declive, superiores a 25°, encontram-se sobretudo a norte na área de estudo, e destacam-se as vertentes voltadas para norte e noroeste, estas vertentes representam cerca de 2,52 % da área da sub-bacia em estudo.

Já os declives inferiores a 10° ocupam grande parte da área em estudo, onde se destacam as áreas aplanadas e planas da várzea de Loures, a leste da área de estudo, bem como os principais vales, de oeste e sudoeste.

*Tabela 3 - Classes de declive na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures*

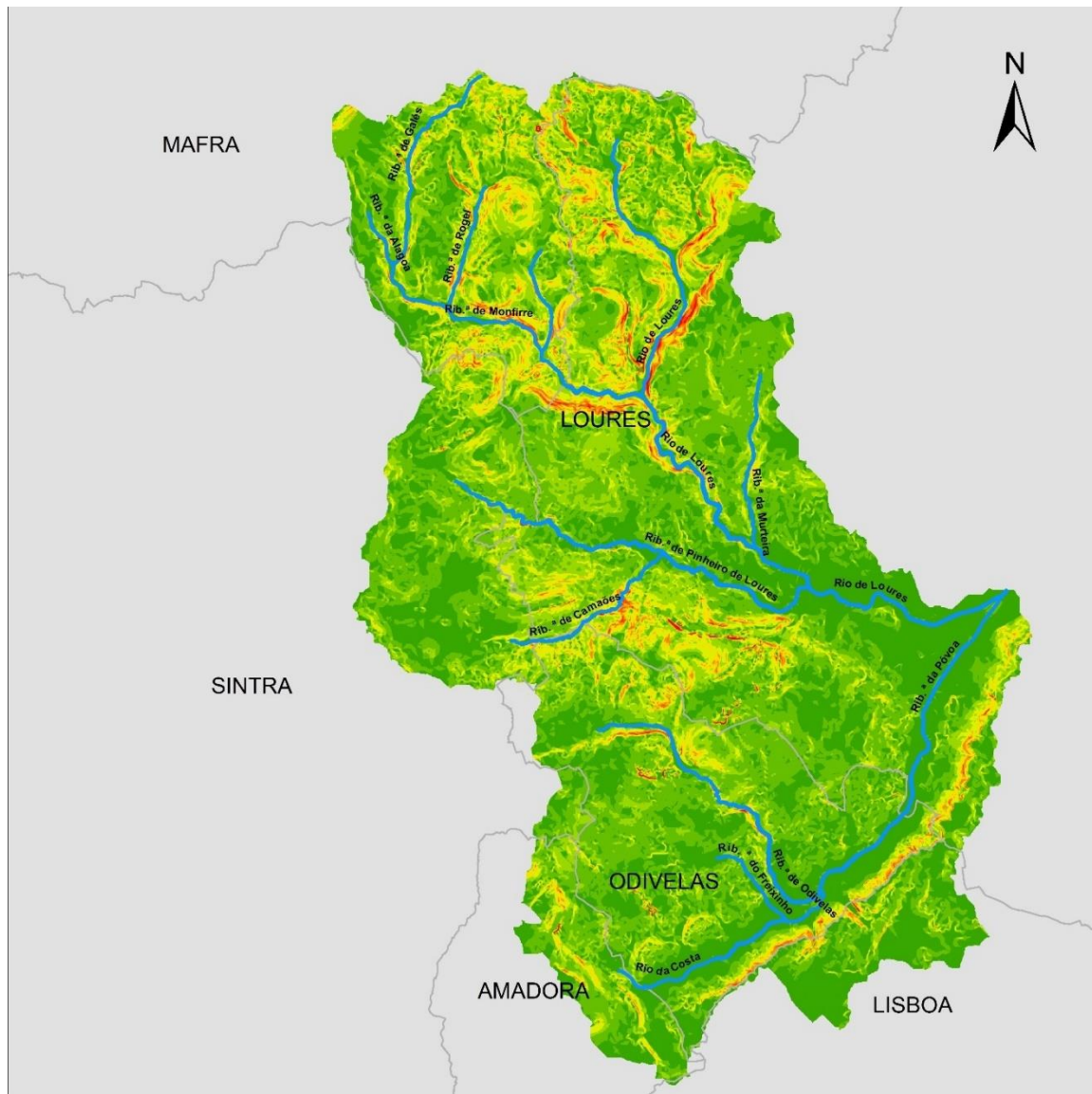
<b>Declive (graus)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
0 – 5	37,82	30,32
5 – 10	42,06	33,73
10 – 15	23,92	19,18
15 – 20	12,10	9,70
20 – 25	5,66	4,54
25 – 30	2,29	1,83
30 – 35	0,66	0,53
>35	0,20	0,16

Com recurso aos sistemas de informação geográfica, é atualmente possível calcular um declive médio sem utilizar qualquer tipo de fórmula matemática.

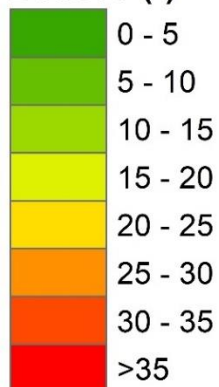
A cabeceira do rio situa-se a cerca de 157 m de altitude, na localidade de Lousa, em que o curso de água tem um declive pouco acentuado até atingir os 138 m, nas imediações da localidade de Encosta da Saúde. Seguidamente existe uma zona com forte declive até a localidade de Barro perto do centro de Loures e da localidade do Fanqueiro, é aqui que se encontra a confluência entre o rio de Loures e a ribeira de Pinheiro de Loures (figura 5).

O curso de água entra na depressão de Loures, quando este tem uma altitude de 14 m, já estando no interior da cidade de Loures. Daí adiante o rio não tem grandes alterações de

altitude, tendo um desnível baixo em toda a restante extensão devido à desembocadura se encontrar na Várzea de Loures, região com um relevo bastante aplanado.



**Declive (°)**



— Rede Hidrográfica Principal

— Limites Administrativos



Sistema de Coordenadas:  
ETRS 1989 Portugal TM06

Figura 4 - Distribuição espacial do declive na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures

Considerando o valor do comprimento total do rio (14,60 km), apresentado anteriormente, e a amplitude altimétrica de 181 m, a inclinação média dos canais fluviais é de 2,6 %.

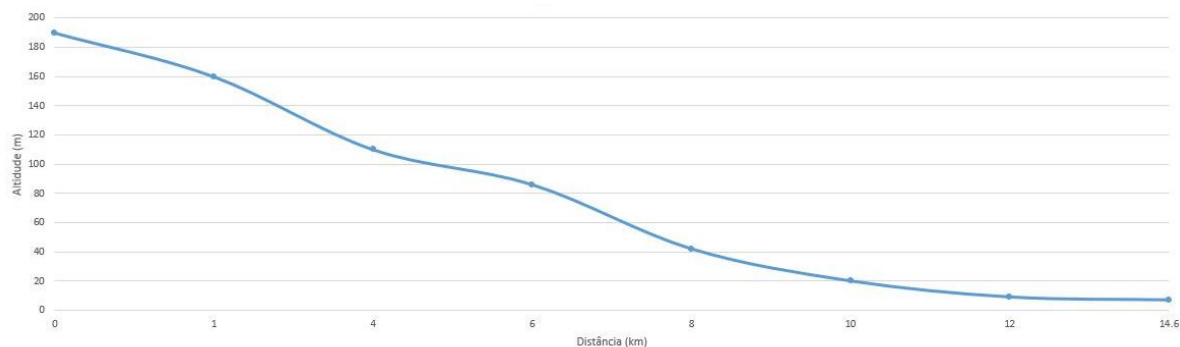


Figura 5 - Perfil Longitudinal do rio Loures

### 2.3.2 Forma e geometria da bacia

A área de uma bacia é um fator importante na definição da mesma, devido ao facto de que, quanto maior é a área de uma bacia hidrográfica, por norma maior será o caudal de uma eventual cheia que possa ocorrer na mesma. Contudo, quando ocorre um episódio de precipitação, que apenas, abrange parte da bacia, a atenuação dos caudais de ponta de cheia, à medida que se desloca através da rede hidrográfica de montante para jusante, é maior numa com grande captação do que com uma pequena.

Além disso, a geometria da bacia e a densidade hídrica e de drenagem, em conjunto influenciam o tamanho e a magnitude do pico de cheia (Smith & Ward, 1999). A tendência para a ocorrência de inundações fluviais é tanto mais acentuada, quanto mais circular for a bacia, devido a uma bacia destas características ter, em hábito, confluências de tributários de uma maior magnitude, e a maior proximidade entre confluências. Por norma, este facto leva a um aumento repentino de escoamento e carga sedimentar, influenciando a distribuição de terraços ou barreiras sedimentares, aumentando o nível das margens e, conseqüentemente, aumentando a altura a que a água das ocorrências de cheia chega a afetar as margens do rio (Brierley, 2008). Além disto, uma bacia destas características tem uma maior probabilidade de ser atingida na sua totalidade por uma chuvada intensa e concentrada (Ramos, 2008).

A geometria de uma bacia hidrográfica pode ser caracterizada através de vários indicadores e fatores. Na caracterização da forma da bacia, por exemplo, é importante ter em mente os conceitos de área, comprimento e perímetro da bacia. A área da bacia é a superfície plana, em projeção horizontal, limitada pelo perímetro da bacia, sendo que este corresponde

à linha divisória de águas da bacia, ou seja, ao comprimento da linha que a delimita (Ramos, 2008). A área da bacia em estudo tem 124,71 km<sup>2</sup> e o perímetro é de 67,79 km.

O comprimento da bacia é a distância em linha reta entre a desembocadura e um ponto definido no perímetro da bacia, sendo que este ponto pode ter vários critérios de definição, segundo (Ramos, 2008): (1) comprimento do curso de água principal, (2) distância medida em linha reta, entre a desembocadura, (3) maior distância, em linha reta, entre a desembocadura e determinado ponto situado ao longo do perímetro, (4) distância, em linha reta, entre a desembocadura e o ponto do perímetro de cota mais elevada. Destes quatro critérios, seguiu-se o terceiro critério para a definição do comprimento da sub-bacia do rio de Loures, obtendo-se um valor de 14,524 km.

Como foi mencionado, existem outros indicadores que representam a geometria de uma bacia. Apresentando primeiramente o Fator Forma (Horton), este tem o intuito de estabelecer uma relação entre a forma da bacia e a forma de um retângulo, comparando a largura média ao comprimento da bacia.

$Ff = \frac{Lm}{Cb}$ , todavia como  $Lm = \frac{A/Cb}{Cb}$ , então  $Ff = \frac{A}{Cb^2}$  (Eq. 6), sendo  $A$  a área da bacia e  $Cb$  o comprimento da bacia em km.

$$Ff = \frac{A}{Cb^2} \quad (6)$$

$$Ff = \frac{124,71}{14,524^2}$$

$$Ff = 0,59$$

No caso da bacia do rio de Loures, obteve-se um fator forma de 0,59, um valor intermédio entre arredondada (0,9) e alongada (0,1). Logo, este índice revela a sub-bacia do rio de Loures como sendo relativamente oval, representando um valor de média tendência de cheias.

De seguida, apresenta-se o Índice de Gravelius ou Coeficiente de Compacidade, representado pela Eq. 7, relaciona a forma da bacia em relação a um círculo. O seu valor mínimo é 1, tratando-se nesse caso de uma bacia irrealisticamente circular (Leal, 2011). Sobre os parâmetros do cálculo do índice, 0,28 é uma constante,  $p$  é o valor do perímetro em  $km$  e  $A$  o valor da área em  $km^2$ .

$$Kc = 0,28 \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (7)$$

$$Kc = 0,28 \frac{67,79}{\sqrt{124,71}}$$

$$Kc = 1,70$$

Na bacia do rio de Loures, existe um coeficiente de compactidade de 1,70, ligeiramente acima do limiar de 1,6 que define bacias compactas (Leal, 2011), considerando-se quase impossível encontrar bacias acima de 2.

### 2.3.3 Litologia

As características do substrato geológico, do solo e subsolo condicionam o escoamento superficial, modelando não só a rede de drenagem, mas também a erosão e a infiltração e, conseqüentemente, influenciando os caudais dos cursos de água e a ocorrência de pontas de cheia (Ramos, 2008). A sedimentação é fortemente determinada pela litologia, sendo que esta provém do declive, da litologia e do clima (Brierley, 2008), afetando a formação do solo, sendo este a película superficial das bacias que tem uma influência inicial no escoamento destas através da sua espessura e textura (Ramos, 2008).

A área em estudo, encontra-se inserida na unidade hidrogeológica e na unidade morfoestrutural da Orla Mesocenozóica Ocidental. As formações geológicas identificadas na bacia hidrográfica em estudo, através das Carta Geológica de Portugal, em escala 1:25 000, e a nota explicativa da mesma cartografia na escala 1:50 000, folha 34B-Loures, do LNEG, foram divididas em 18 classes litológicas, através das suas características em relação aos comportamentos hidrogeológicos e hidrográficos (Tabela 4).

Tabela 4 - Formações geológicas e classes litológicas existentes na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures

Formações geológicas	Classes litológicas	Área	
		km <sup>2</sup>	%
Aluviões, aterros	Aluviões, aterros	11,42	9,05
Formação das Areias de Quinta do Bacalhau (MIVb)	Areias	1,53	1,21
Areias e cascalheiras de génese indiferenciada			
Formação das Areias com <i>Placunamiocenica</i> (MVa2)			
Formação das Areias de Vale de Chelas (MVb)	Arenitos, conglomerados e pelitos	1,24	0,98
Formação de Fonte Grada: arenitos, conglomerados e pelitos			
Formação de Vale de Lobos: arenitos, conglomerados e pelitos	Arenitos, margas e calcários	0,24	0,19
Formação de Freixial: arenitos, margas e calcários			

Formações geológicas	Classes litológicas	Área	
		km <sup>2</sup>	%
Formação de Regatão: arenitos, pelitos e dolomitos	Arenitos, pelitos e dolomitos	1,84	1,46
Formação de Porto da Calada: arenitos, pelitos, calcários e dolomitos	Arenitos, pelitos, calcários e dolomitos	1,74	1,38
Formação das Areolas de Estefânia (MII)	Areolas	0,77	0,61
Formação de Bica: calcários com rudistas (inclui o nível com <i>Neolobites vibrayeanus</i> )	Calcários	5,22	4,14
Formação dos Calcários de Entre-Campos ("Banco Real") (MIII)			
Formação dos Calcários de Casal Vistoso (MVa1)			
Formação dos Calcários de Musgueira (MVa3)			
Formações de Cabo Raso e de Guincho indiferenciadas: calcários recifais e calcários com Chofatell			
Formação dos Calcários de Quinta das Conchas (MVc)			
Formação de Benfica: intercalações calcárias (Calcários de Alforneiros)	Calcários e arenitos	21,85	17,32
Formação de Caneças: calcários e arenitos ("Belasiano")			
Formações de Ribamar e de Ribeira de Ilhas indiferenciadas: calcários, arenitos e pelitos	Calcários, arenitos e pelitos	1,60	1,27
Formações de Serradão e de Guia indiferenciadas: calcários, margas e arenitos	Calcários, margas e arenitos	0,18	0,14
Complexo Vulcânico de Lisboa: rochas piroclásticas	Complexo Vulcânico de Lisboa	42,69	33,85
Formação de Benfica: conglomerados, arenitos e argilitos	Conglomerados, arenitos e argilitos	17,13	13,58
Depósitos de terraços fluviais Depósitos de terraços indiferenciados	Depósitos de terraços fluviais	0,22	0,17
Filões de rocha alterada e ou não identificada	Filões e massas	3,97	3,15
Filões e massas de traquito			
Filões e massas de riólito			
Rochas vulcânicas indiferenciadas			
Filões e massas de basalto			
Filões e massas de teralito			
Formação das Argilas de Forno do Tijolo (MIVa)	Formações argilosas	1,59	1,26
Formação das Argilas dos Prazeres (MI): argilitos e calcários			
Formações de Santa Susana e de Praia dos Coxos indiferenciadas: margas, arenitos, calcários e pelitos	Margas, arenitos, calcários e pelitos	0,66	0,52
Formação de Serreira: pelitos, arenitos e conglomerados	Pelitos, arenitos e conglomerados	12,24	9,70
Formação de Rodízio: pelitos, arenitos e conglomerados			

Segundo Reis (2006), "A quantidade de água que se infiltra depende essencialmente das características intrínsecas das rochas (...) Porém a identificação da permeabilidade encerra várias dificuldades que passam, principalmente, pelo conhecimento, com suficiente

pormenor, das propriedades dos litofácies (assim como da sua variação espacial), do grau de fracturação das rochas (...). Isso significa, por outras palavras, que quando se realiza um estudo sobre a temática das cheias e inundações, aquando se está a realizar uma análise dos substratos geológicos presentes na bacia hidrográfica, importa saber essencialmente a permeabilidade que cada formação geológica tem e agrupá-las em classes litológicas mediante os seus materiais e características semelhantes em termos de composição, visto que, a infiltração da água nos substratos geológicos depende sobretudo nas características intrínsecas das rochas.

A permeabilidade da bacia, condiciona a infiltração da água e a profundidade da infiltração e do nível do aquífero que influencia o local (se é mais a montante ou a jusante que a água infiltrada que entra na rede hidrográfica) e a magnitude que o escoamento tem e, naturalmente, do episódio de cheia. Por exemplo, se uma bacia detém pouco armazenamento subterrâneo, é mais suscetível à ocorrência de cheias em episódios de precipitação (Smith & Ward, 1999).

Uma bacia impermeável, ao dificultar a infiltração tem determinadas características como:

- favorecimento do desenvolvimento e hierarquização da rede de drenagem e a densidade desta;
- aumento do escoamento direto;
- potenciamento quer da frequência quer da magnitude das cheias (Ramos, 2008) (figura 6).

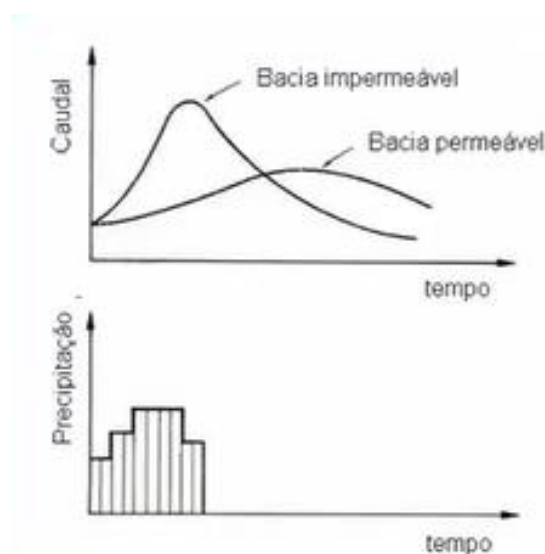


Figura 6 - Relação entre a permeabilidade do solo e subsolo e os caudais de ponta de cheia. Adaptado de Ramos (2008)

Uma bacia impermeável é tipicamente associada a uma maior densidade de drenagem e a uma litologia mais resistente, como sejam rochas metamórficas como os xistos, quartzitos ou grauvaques (Sear *et al.*, 2004). A área estudada revela ter uma grande heterogeneidade litológica, que é responsável pelas diferenças de permeabilidade ao longo do território, e consequentemente a capacidade de armazenamento de água.

Esta sub-bacia é destacada pela fraca permeabilidade dos materiais constituintes na maioria da sua extensão, com grande presença de materiais do Complexo Vulcânico de Lisboa, ocupando 33,85 % da área total e com bastante presença de margas, argilitos e pelitos (figura 7).

Mesmo havendo presença de materiais mais permeáveis, tais como, os arenitos e os calcários, estes por norma aparecem, na sua generalidade, associados a materiais intercalados de menor permeabilidade, e que por norma, dando o exemplo da Formação de Benfica, têm cimentação argilosa que faz com que estes materiais favoreçam o escoamento direto na bacia. Já os materiais das formações carbonatadas da Bica e Caneças, calcários de Entrecampos, areolas da Estefânia e as aluviões, apresentam uma permeabilidade mais elevada, propiciando a infiltração de água.

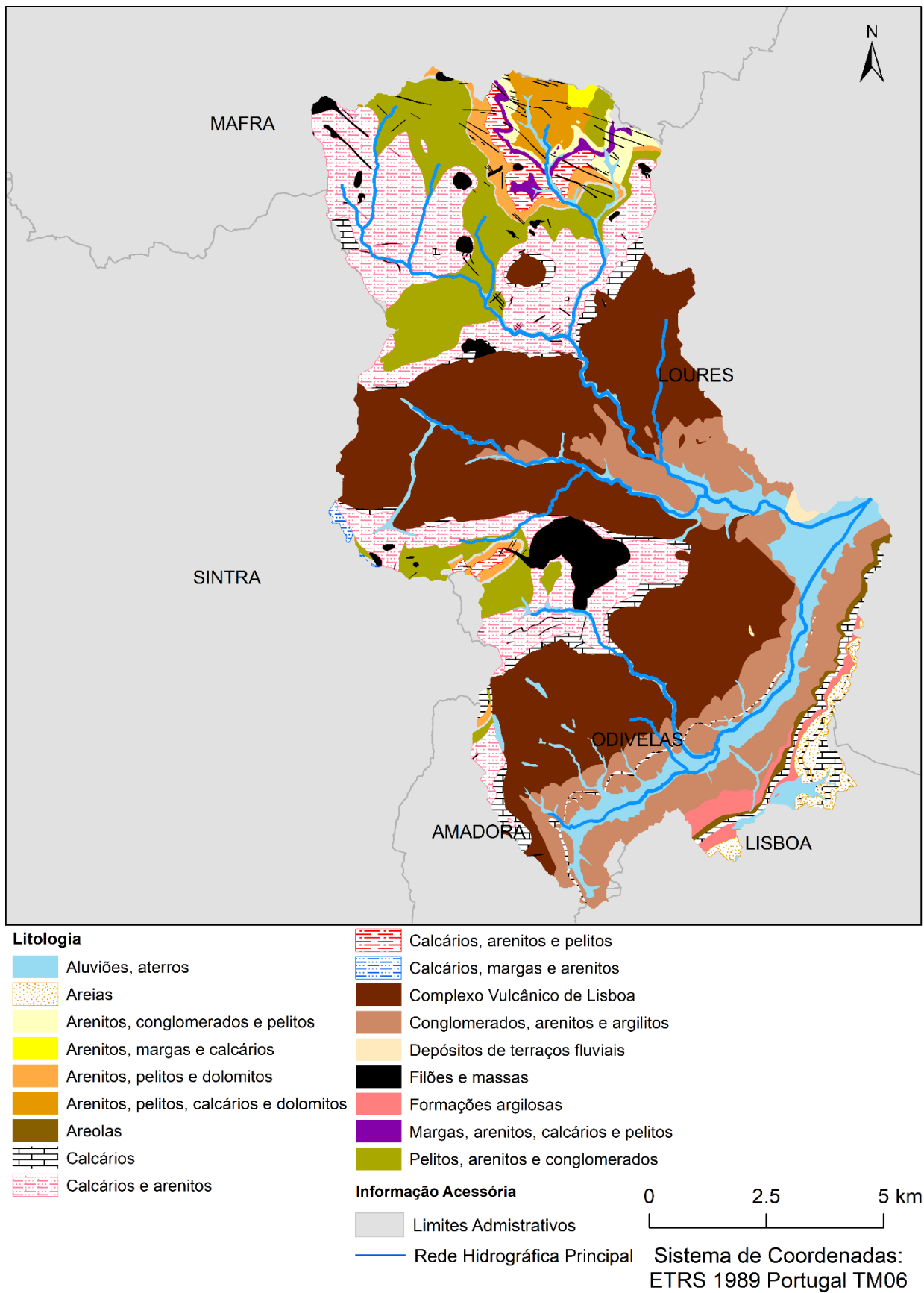


Figura 7 - Litologia na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures (Fonte: elaborado a partir da Carta Geológica)

#### **2.3.4 Solos**

Segundo Ramos (2008), os solos formam a película superficial das bacias hidrográficas e têm influência no escoamento das mesmas, através da sua espessura e estrutura. A sua permeabilidade é condicionada sobretudo pela textura, estrutura, grau de compactação e teor de matéria orgânica constituintes dos solos presentes nas bacias hidrográficas.

Tal como foi dito anteriormente, as bacias hidrográficas que tenham características que não favoreçam a infiltração, acabam por favorecer o escoamento direto, o que potencia uma redução do tempo de concentração e um aumento no caudal de ponta de cheia e, consequentemente, a ocorrência de cheias com elevada severidade.

Através da cartografia de solos da sub-bacia hidrográfica estudada, pode-se verificar que os solos litólicos são o tipo de solo mais representado na bacia hidrográfica com 26,27 %, seguido dos barros com 21,4 % e os solos calcários com 18,15 %. Os litólicos são solos pouco evoluídos e estão dispersos pela bacia toda, estes são solos de textura franco arenosa e são bem drenados. Os solos calcários, à semelhança dos litólicos, também são pouco evoluídos, contudo, aqueles são formados por rochas de natureza calcária. Já os barros castanho-avermelhados são solos evoluídos, com elevada capacidade de retenção da água, e na sua composição têm teores de argila bastante acentuados.

Destacar ainda, os solos mediterrâneos presentes na bacia hidrográfica com uma percentagem de 7,66 % da área da bacia. Estes solos, por norma, são constituídos por argilas ou argilitos, calcários de textura franco-argilosa a argilosa e por arenitos finos.

Os aluviosolos, que ocupam 6,31 % da bacia hidrográfica, são solos incipientes que derivam de depósitos estratigráficos de origem aluvionar. Na área em estudo, os aluviosolos apresentam idades diversificadas (modernos e antigos), sendo que o primeiro ainda obtém sedimentos por deposição aluvial, e os segundos pelo contrário já não recebem depósitos de sedimentos aluviais.

Já os coluviosolos, com uma ocupação da bacia de 4,62 %, provêm de origem coluvial e encontram-se localizados nos fundos de vale, bases de encosta e depressões. Este tipo de solos é caracterizado por uma textura ligeira a pesada, e são calcários ou não calcários. No geral, são solos profundos, com pouca capacidade de drenagem e sujeitos a inundações.

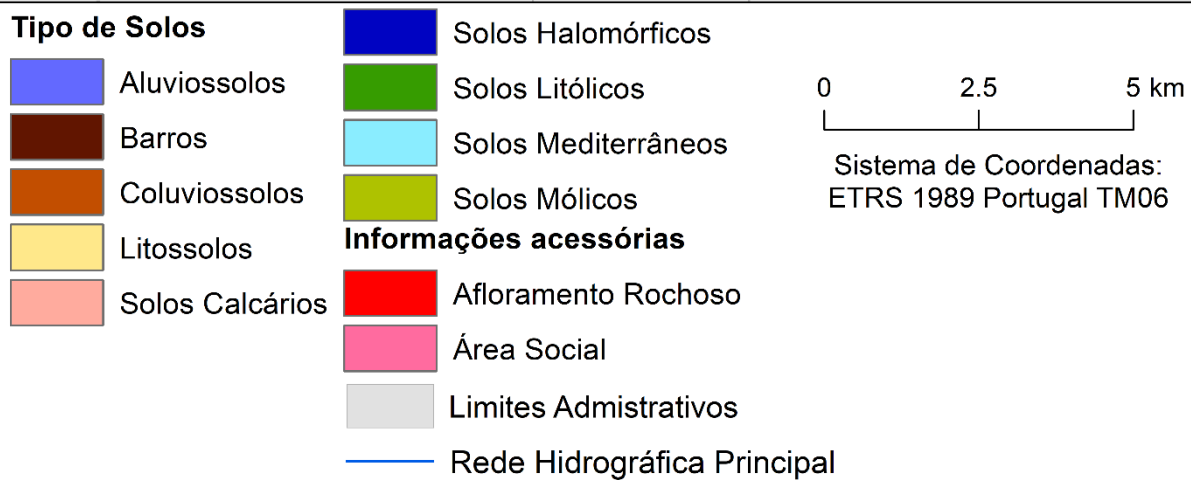
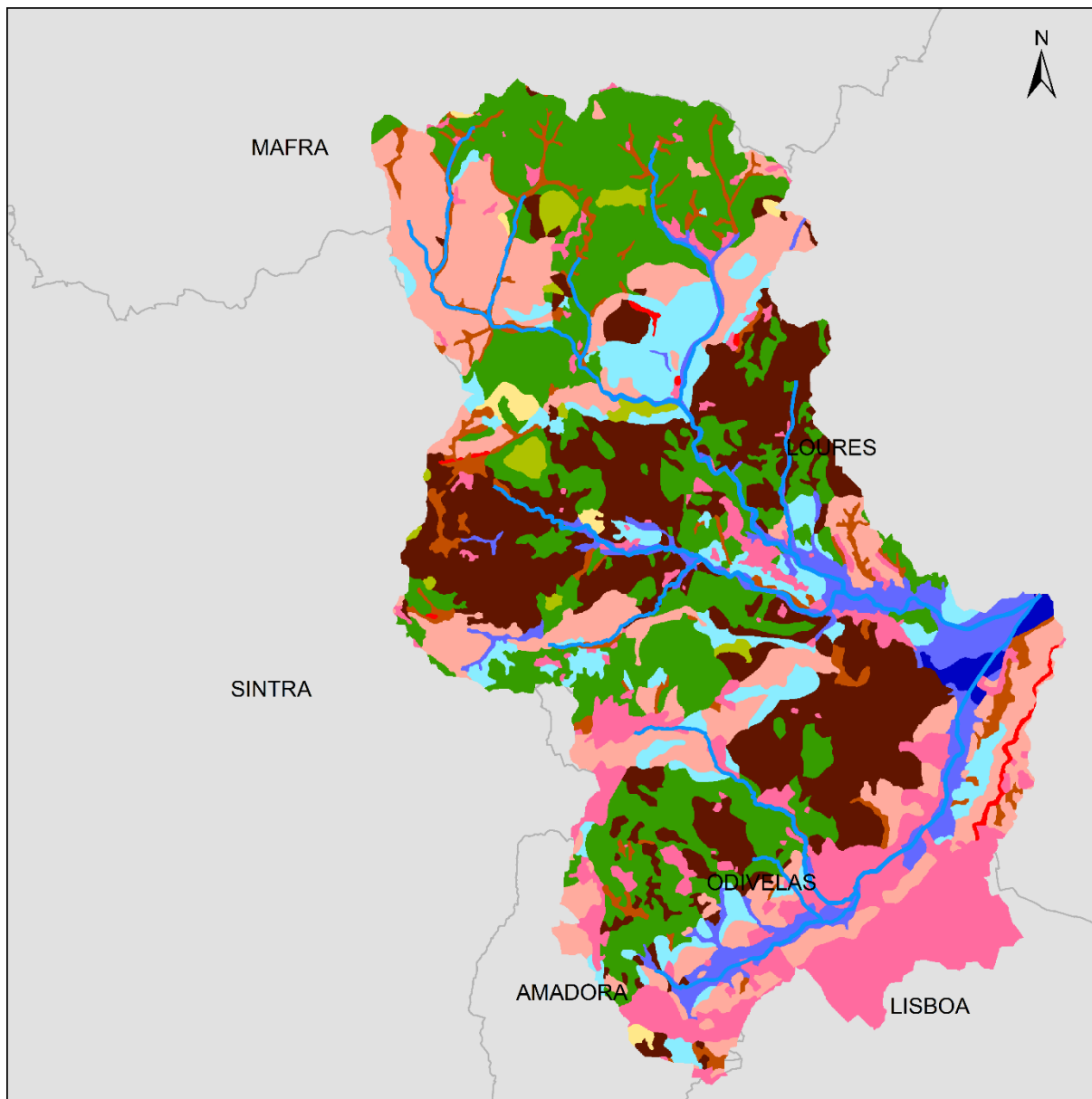


Figura 8 - Tipos de Solos presentes na sub-bacia hidrográfica do rio de Loures (Fonte: produzido através da Carta de Solos de Portugal, 1/25000, DGADR)

Tabela 5 - Tipos de Solo na Sub-bacia Hidrográfica do rio de Loures

Tipos de solo	Área	
	km <sup>2</sup>	%
Afloramentos rochosos	0,46	0,36
Aluviossolos	7,87	6,31
Barros	26,68	21,4
Coluviossolos	5,76	4,62
Litossolos	0,67	0,54
Solos Calcários	22,64	18,15
Solos Halomórficos	0,82	0,66
Solos Litólicos	32,76	26,27
Solos Mediterrâneos	9,55	7,66
Solos Mólicos	1,66	1,33
Área Social	15,84	12,7

Com observação da tabela 5 e da figura 8, percebe-se que a sub-bacia em estudo tem uma grande diversidade, no que toca aos tipos de solos, sendo estes muito diferentes entre si, contudo, pode-se afirmar que no geral os solos presentes na sub-bacia hidrográfica destacam uma baixa permeabilidade, sendo esse um fator que pode favorecer a ocorrência de cheias rápidas em momentos de precipitação intensa.

### 2.3.5 Rede de drenagem

Em relação à rede de drenagem, esta é influenciada pelas condições litológicas, morfológicas e climáticas do território (Brierley, 2008). A rede de drenagem tem uma relação com a ocorrência de cheias, pois uma bacia com uma rede de drenagem de baixa sinuosidade e com uma morfologia declivosa, é mais favorável à ocorrência de cheias e produz caudais de ponta elevados, de uma forma mais rápida (Ramos, 2008). As características da rede de drenagem influenciam a magnitude dos picos de cheia (Smith & Ward, 1999), sendo que estas podem ser caracterizadas por diversas medidas e parâmetros, dos quais se apresenta aqui o comprimento do curso principal, a hierarquia, a magnitude, a densidade hídrica, a densidade de drenagem, a extensão média do escoamento superficial sobre as vertentes e o coeficiente de manutenção.

Segundo Ramos (2008), o comprimento do curso de água principal é a distância desde a desembocadura até à nascente ou cabeceira, estendida ao longo de um curso de água, sendo que o rio de Loures, tem um comprimento de 14,6 km. Este valor foi calculado através

da criação de um ficheiro vetorial linear para o traçado do curso de água principal, do qual se mediu o seu comprimento.

Existem vários critérios de definição do curso de água principal, sendo que todos iniciam a definição desde a desembocadura, para montante, até à cabeceira. O método de Horton determina duas regras: (1) estender a linha do curso de água para montante, para além da bifurcação, seguindo a mesma direção; o canal confluyente que apresentar maior ângulo é o de ordem menor e (2) se ambos os cursos de água possuem o mesmo ângulo de confluência, o de maior dimensão é geralmente o de ordem mais elevada. Este foi o método utilizado para a determinação do curso de água principal. Por sua vez, existe também o método de Shreve que, em cada bifurcação, escolhe o curso de água mais longo, e segue a linha de água a montante situada numa posição altimétrica mais baixa até atingir a cabeceira do segmento de primeira ordem localizado a menor altitude (Ramos, 2008).

O método de Shreve classifica a rede de drenagem quanto à sua magnitude - sendo que no presente estudo extraiu-se com utilização dos SIG (em ambiente *raster*), através do modelo digital do terreno, obteve-se a rede de drenagem, sendo que, o critério utilizado foi a rede de drenagem com valor de 5000 km<sup>2</sup> - sendo esta igual ao número de cursos de água ou cabeceiras que existem numa bacia hidrográfica. Na bacia do rio de Loures, o índice tem valor máximo de 69, exprimindo a existência de 69 cursos de água na bacia hidrográfica.

Por outro lado, também se pode categorizar a rede de drenagem através da hierarquia de Strahler, que classifica os cursos de água de uma bacia hidrográfica pela ordem de importância. A classificação final resulta de um agrupamento de canais – os canais de ordem 1 não possuem tributários, os de ordem 2 resultam da confluência de dois canais de ordem 1, e assim sucessivamente (Ramos, 2008), sendo que a bacia do rio de Loures tem hierarquia 4. Num estudo de temática de cheias, deve-se proceder a uma utilização conjunta da hierarquia e da magnitude, pois cursos de água com o mesmo número de ordem, porém com diferentes números de cursos de água, respondem hidrológicamente de forma diferente em situação de cheia (Ramos, 2008).

A densidade hídrica (Eq. 8) é um dos indicadores que caracterizam uma bacia hidrográfica. Este índice representa a capacidade que uma área tem para criar novos cursos de água, indicando o número de cursos de água existentes por km<sup>2</sup>, sendo  $N$  o número total de cursos de água existentes na bacia e  $A$  é a área da bacia. Através deste indicador, pode-se concluir que a bacia do rio de Loures, em média, tem aproximadamente seis cursos de água por km<sup>2</sup>.

$$Dh = \frac{N}{A} \quad (8)$$

$$Dh = \frac{742}{124,71}$$

$$Dh = 5,95 \text{ cursos de água por } km^2$$

A densidade de drenagem é um dos indicadores mais importantes na caracterização de uma rede de drenagem, pois relaciona-se, de forma direta, com o processo de sedimentação e com a hidrologia de cheias numa bacia (Sear *et al.*, 2004). Este indicador estabelece a relação entre o comprimento total ( $Ct$ ) dos cursos de água da bacia (em km) e a área da bacia ( $A$ ), em  $km^2$ , funcionando como um indicador das condições da rede de drenagem, da disponibilidade de água para o escoamento, do relevo, da litologia e dos solos e uso do solo (Sear *et al.*, 2004). Isto é, por exemplo, em relação ao relevo, se existe entalhe e cursos de água, em função do declive.

A litologia, os solos e o uso do solo são fatores condicionantes da infiltração, sendo que quanto maior a infiltração, menos água existirá disponível para escoamento superficial (Almeida & Romariz, 1989). Se a densidade de drenagem (Eq. 9) é elevada, é indicador de que a água se concentra rapidamente para os fundos de vale, o que favorece a ocorrência de cheias rápidas. As áreas com uma maior densidade de cursos de água por unidade de superfície transportam mais sedimentos, criando uma maior dinâmica na paisagem (Sear *et al.*, 2004). Além disto, sendo a densidade de drenagem uma expressão inversa à extensão das vertentes, esta exprime concentrações rápidas do escoamento nos fundos de vale, quando os valores são elevados.

$$Dd = \frac{Ct}{A} \quad (9)$$

$$Dd = \frac{389,58}{124,71} = 3,12$$

O resultado deste índice expõe que na bacia hidrográfica do rio de Loures existem 3,12 km de rede de drenagem por cada  $km^2$ . Este valor fornece informações contextuais sobre a bacia, sendo que segundo (Ramos, 2008), encontra-se na classe baixa da densidade de drenagem, embora estes valores apenas sejam válidos para uma escala 1:25 000. Portanto, não se consegue classificar os valores da rede de drenagem como sendo muito baixos ou muito altos.

O Coeficiente de Manutenção de Schumann, representado pela Eq. 10, fornece o valor da área mínima necessária ao desenvolvimento ou manutenção de um metro de canal de escoamento e calcula-se invertendo a densidade de drenagem ( $Dd$ ), segundo a fórmula seguinte.

$$Cm = \frac{1}{Dd} \times 1000 \quad (10)$$

$$Cm = \frac{1}{3,12} \times 1000$$

$$Cm = 320,51$$

Segundo Leal (2019), “valores elevados de densidades de drenagem e hídrica e valores baixos do comprimento médio das vertentes e do coeficiente de manutenção revelam que a rede de drenagem natural de uma bacia hidrográfica é eficiente” e que isso resulta numa rápida concentração do escoamento superficial nos talwegues e no canal principal.

O  $Cm$  é considerado um dos valores numéricos mais importantes para a caracterização da rede de drenagem. Quanto menor o seu valor, mais rapidamente a água proveniente da precipitação se concentra nos canais fluviais, aumentando a suscetibilidade das bacias hidrográficas à ocorrência de inundações fluviais (Ramos, 2008). Neste caso, foi estimado que é necessário um valor mínimo de 320,51 m para o desenvolvimento ou manutenção de um metro de canal de escoamento.

## 2.3.6 Uso e ocupação do solo

### 2.3.6.1 Caracterização do uso e ocupação do solo

Em Portugal, entre 2009 e 2014, vivia-se um cenário de recessão económica, e segundo Auch *et al.* (2012), neste contexto é esperado que o desenvolvimento de novos projetos venha a diminuir e, conseqüentemente, a dinâmica evolutiva das áreas edificadas diminui. Na última década este fator poderá ter contribuído para um abrandamento da construção, que foi particularmente acentuado nas regiões Centro e Norte, onde se localiza uma maior percentagem de povoamentos (Meneses *et al.*, 2017).

Tendo em conta que a figura 9, onde está representado o uso e ocupação do solo remetente ao ano de 2018, consegue-se compreender que a região meridional da bacia do rio de Loures, é caracterizada pela elevada percentagem de artificialização, cerca de 60,6 %.

Esta é composta essencialmente por tecido urbano, e encontra-se junto das cidades de Odivelas e Loures, e áreas envolventes.

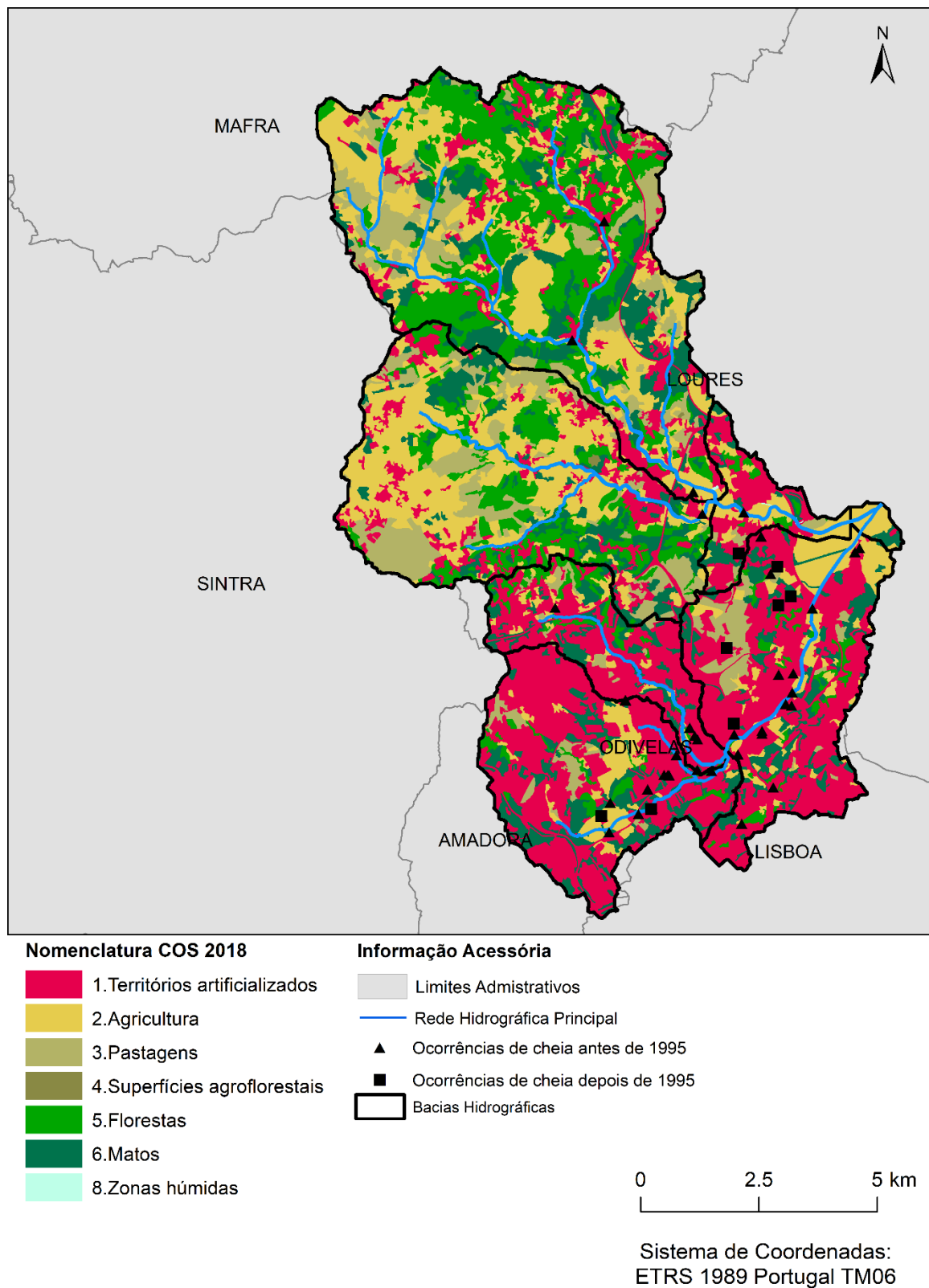


Figura 9 - Distribuição espacial do uso e ocupação do solo e das ocorrências de cheia da base de dados DISASTER.

Já a parte setentrional da bacia é composta por uma maior variedade de uso e ocupação de solo. Estas maioritariamente ocupadas por áreas de floresta e agricultura, acabam por ser áreas mais permeáveis, o que ajuda na infiltração da água durante eventos de precipitação intensa.

Com recurso à figura 9 é possível observar que grande parte das ocorrências, sejam antes do período de estudo, sejam durante o período de estudo, ocorrem tendencialmente na parte sul (área mais artificializada). Contudo, a drenagem ocorre em direção ao setor sul e sudeste da bacia hidrográfica, e é neste local que se encontram os fundos de vale de maior dimensão da área de estudo, que recebem todo o escoamento proveniente de montante, sendo expectável a ocorrência de cheias nesta área, e não nos setores a montante, com cotas mais elevadas e áreas de drenagem mais pequenas. Estes dois fatores potenciadores da ocorrência de cheias rápidas incrementam a suscetibilidade, a que se adiciona o indevido uso e ocupação do solo (Meneses *et al.*, 2018). A base de dados DISASTER – que regista o histórico de cheias ocorridas nesta área – mostra que as áreas onde a artificialização é maior têm duas interpretações associadas: por um lado, são as áreas de maior exposição, por outro, são as áreas onde a o escoamento superficial é favorecido em detrimento da infiltração.

### 2.3.6.2 Número de Escoamento

Tanto os solos como o substrato geológico e a litologia, regulam o escoamento superficial, bem como os processos e fenómenos de erosão e as pontas de cheias que ocorrem nas bacias hidrográficas (Ramos, 2008). Por norma, para se quantificar o número de escoamento (CN) recorre-se à classificação hidrológica dos solos que, de acordo com a classificação apresentada pelo método do *Soil Conservation Service* (SCS), podem ser classificados em quatro tipos distintos: A, B, C e D (tabela 6).

Tabela 6 - Classificação hidrológica dos solos segundo o SCS (Adaptado de Lencastre e Franco, 1992).

Tipo de solo	Características dos solos
<b>Grupo A</b>	São solos com um potencial de escoamento superficial baixo. Estes por terem um baixo escoamento direto, tem consequentemente uma permeabilidade bastante elevada. Estes solos são constituídos por norma, por areias com bastante espessura, e com pouco limo e/ou argila, e arenitos com bastante espessura e com uma permeabilidade elevada.
<b>Grupo B</b>	Potencial de escoamento superficial é abaixo da média. Os solos são menos permeáveis que os do tipo A, contudo tem uma permeabilidade superior à média. Estão incluídos fundamentalmente os solos arenosos menos espessos que os do grupo A.

<b>Grupo C</b>	Este contém um potencial de escoamento superficial acima da média. Os solos deste grupo provocam escoamentos diretos superiores à média e superiores aos originados pelos grupos anteriores. Este inclui solos pouco espessos e com uma quantidade substancialmente elevada de argilas, mas com menos presença do que os do grupo D.
<b>Grupo D</b>	Tem elevado potencial de escoamento superficial. Os solos com argilas expansivas e solos pouco espessos, com sub-horizontes praticamente impermeáveis que provocam elevado escoamento direto.

Com o apoio da classificação anterior, determinou-se o número de escoamento, com base no cruzamento do tipo de solo da Carta de Solos de Portugal (1/25000) e na cobertura do solo a duas escalas temporais relativas ao COS 1995 e ao COS 2007. Para tal, utilizou-se as indicações para regiões agrícolas, urbanas e suburbanas e para maior pormenor das regiões rurais, segundo o SCS (Correia, 1984b).

*Tabela 7 - Definição das condições antecedentes de humidade no solo. (Adaptado de Correia 1984b).*

<b>Número de escoamento</b>	<b>Características</b>
<b>CN - I</b>	Circunstância em que os solos estão secos, mas não no ponto de fenecimento. A consideração deste caso é pouco recomendável para estudos de caudais de cheia.
<b>CN - II</b>	Circunstância média em que a humidade do solo deve corresponder perto da capacidade de campo. Este cenário corresponde provavelmente às condições de humidade que antecedem de uma cheia de pequena dimensão.
<b>CN - III</b>	Circunstância em que ocorreram precipitações apreciáveis nos últimos cinco dias, onde o solo se encontra praticamente saturado. Este cenário é mais propício à formação de grandes cheias.

Contudo no caso deste trabalho, para o seu desenvolvimento, utilizou-se a camada do *Curve Number* (CN ou Número de Escoamento) do SNIAmb (APA, 2022).

## Capítulo 3. Metodologia da modelação hidrológica

### 3.1 Pré-processamento de dados com a extensão HEC-GeoHMS

Para a concretização do segundo objetivo será utilizado o programa *ArcGIS*, com a ferramenta HEC-GeoHMS e o programa HEC-HMS, que tem como função simular os processos hidrológicos dos sistemas de bacias hidrográficas. Os resultados que se pretende obter são hidrogramas de cheia para os diferentes períodos e os cálculos dos métodos cinemáticos de avaliação dos caudais. Por outras palavras, para a segunda parte da presente dissertação, modelação hidrológica da sub-bacia, procederam-se à aplicação da metodologia presente no capítulo 13 do *Users' manual de HEC-GeoHMS da USACE* (Chen *et al.*, 2020). Neste capítulo, encontra-se o exemplo explicado passo a passo, sendo que numa primeira parte do mesmo, podem-se considerar passos universais para qualquer tipo de trabalho de modelação hidrológica recorrendo a este programa. No entanto, mediante a bacia hidrográfica que esteja a ser estudada, há parâmetros a dever ser alterados consoante as características da bacia.

Começou-se por criar um projeto novo (sistema de coordenadas ETRS89), onde se utilizou o modelo digital do terreno (MDT) hidrológicamente corrigido, em *raster* com resolução de 10 m, resolução esta considerada adequada para o detalhe associado à informação utilizada e aos objetivos em vista, relativos ao estudo dos impactos do uso e ocupação do solo.

Antes de avançar para a preparação dos dados na extensão para ArcGIS HEC-GeoHMS, calculou-se o declive (%), de forma a permitir o cálculo de outros parâmetros através daquela extensão, como o *BasinCN* e *BasinLag*. Após a obtenção do declive, iniciaram-se os passos presentes no manual acima referido, com o preenchimento das *sinks* (áreas deprimidas no MDT), seguido de *flow direction*, *flow accumulation*, *stream definition*, *stream segmentation*, *catchment delineation*, *catchment polygon processing*, *drainage line processing* e *watershed agregation*. Este conjunto de passos corresponde ao pré-processamento do modelo de terreno de modo a se obter um MDT hidrológicamente corrigido.

### 3.2 Modelo de bacia em HEC-HMS

Para o pré-processamento de bacias hidrográficas (figura 10), recorreu-se à delimitação da área de estudo realizada inicialmente. A partir dessa área e para as sub-bacias identificadas com recurso à extensão HEC-GeoHMS, calcularam-se as suas características físicas, assim como dos respetivos cursos de água.

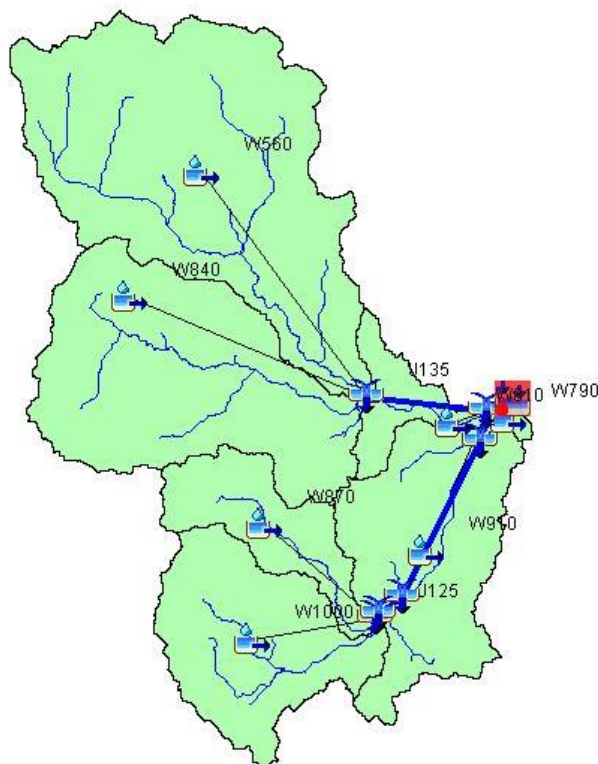


Figura 10 - Modelo de Bacia

Começando pela definição das sub-bacias da área de estudo, para que o programa possa calcular o perfil do rio, no qual vai-se obter os dados de desnível e de extensão dos cursos de água presentes na bacia hidrográfica, contudo é necessário definir os métodos que iremos utilizar.

Tabela 8 - Correspondência das Sub-bacias Finais com as Sub-bacias do HEC-HMS

Sub-bacia	Sub-bacia (HEC-HMS)
Rio da Costa	W1000
Rio de Loures 2	W810
Rio de Loures 3	W790
Ribeira da Póvoa	W910
Rio de Loures 1	W560
Ribeira de Odivelas	W870
Ribeira Pinheiro de Loures	W840

Através das figuras 2 e 10 e com o auxílio da tabela 8 é possível fazer a correspondência das sub-bacias que foram então pré-processadas e das sub-bacias finais que foram estudadas e analisadas ao longo do relatório. As linhas azuis retilíneas correspondem às zonas, que mais à frente irão ser analisadas, onde há confluência de cursos de água e onde o caudal do rio aumenta com a soma dos que provem de montante.

Neste caso, para o *loss method* irá recorrer-se ao método do *Soil Conservation Service* (SCS), método que tem em consideração o uso do solo através da área impermeabilizada, bem como o *curver number* (CN). No *transform method* utilizou-se o *Clark*, no *base flow* não se utilizou nenhum, e para o *route method* foi o lag. Ainda neste conjunto de passos, realizou-se outros processos que não constam no manual para se obter no *CN lag*, este é obtido através do CN, número de escoamento (APA, 2022), onde também é calculado o *Basin lag*, parâmetro importante para os cálculos dos tempos de concentração.

Após os cálculos dos parâmetros necessários para a obtenção dos caudais, é realizada uma preparação dos dados para que estes possam ser utilizados no *HEC-HMS*. Através deste software é feita a importação do modelo de bacia hidrográfica que se criou através dos processos anteriores, seguidamente, procede-se à criação do modelo *HEC-HMS*, introduzindo os parâmetros da sub-bacia e os elementos de escoamento.

Os parâmetros podem ser estimados a partir de estudos anteriores, que é o caso, através do relatório de análise de fenómenos extremos precipitações intensas em Portugal continental (Brandão *et al*, 2001). Este relatório tem como intuito, fornecer dados e informações hidrográficas processadas, tendo-se recorrido ao relatório para obter dados de precipitação para o período de retorno de 100 anos, obtidos através das curvas IDF, tendo por base a estação de São Julião do Tojal (estação mais próxima da área de estudo).

### 3.3 Dados de entrada no modelo meteorológico

Durante o processo de definição das sub-bacias em ambiente SIG, com recurso à extensão *HEC-GeoHMS*, iriam ser calculados determinados índices, tais como, o tempo de concentração, tempo de resposta (*lag time*) e o coeficiente de armazenamento (*storage coefficient*). Estes são estritamente necessários para o método de *Clark*, para a transformação da precipitação em escoamento, escolhido durante o processo de modelação hidrológica. Por alguma falha na corrida da extensão *HEC-GeoHMS*, o tempo de concentração ( $T_c$ ) não foi calculado, de forma automática. Assim, o  $T_c$  foi calculado através do *BasinLag* (horas), representado pela Eq. 11, que é obtido pelo *HEC-GeoHMS* e patente na *feature Subbasin*.

$$BasinLag = 0.6 * T_c, \quad \text{logo,} \quad T_c = \frac{BasinLag}{0.6} \quad (11)$$

Assumiu-se a relação expressa entre tempo de resposta da bacia e tempo de concentração, de que “estudos efetuados através do SCS concluíram que, em geral, o tempo de resposta, pode ser aproximadamente 60 % do tempo de concentração ” (Fleming & Doan, 2013).

O coeficiente de armazenamento (*storage coefficient*, SC) pode ser estimado pela seguinte fórmula (Eq. 12):

$$\text{Storage Coef} = 1.6 * T_c \quad (12)$$

Os valores de precipitação são obtidos através de Brandão *et al.* (2001). Este é o mais recente e recomendado, mesmo em avaliações de ZAC no âmbito da Reserva Ecológica Nacional. Neste relatório é importante retirar os dados de precipitação do Anexo II, página 53, que se refere ao período de retorno de 100 anos, duração de 24 horas, que para S. Julião do Tojal, estação mais próxima do local de estudo, de valor de 156,2 mm. Este seria o valor a converter para polegadas (in).

“*The lag time is defined as the time between the centroid of excess precipitation and the peak of the resultant hydrograph*” (Bedient *et al.*, 2008). O tempo de resposta, ou *lag time*, pode ser calculado pelo método do *Soil Conservation Service* pela seguinte equação (Eq. 13) (Kaatz, 2014):

$$T_{lag} = \frac{l^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900y^{0.5}} \quad (13)$$

Onde:

$T_{lag}$  = Tempo de Resposta (hrs)

$l$  = comprimento da saída da sub-bacia para dividir o caminho de drenagem (ft)

$y$  = Declive da sub-bacia (%)

$S = 1000/CN - 10$  (in)

$CN$  = Curve Number da sub-bacia.

A partir dos dados de entrada, corri a sequência de processos usando a extensão HEC-GeoHMS, de modo a importar o modelo HMS já no ambiente do programa HEC-HMS. O valor de declive em cada sub-bacia (*slope* em %) foi inserido manualmente devido a erro na corrida da extensão. Após essa inserção manual, não se verificou qualquer problema na execução dos passos. Conseguiu-se calcular *BasinCN* e *BasinLag*.

O processo de preparação do modelo hidrológico foi executado a partir do Capítulo 13 do *User's Manual HEC-GeoHMS*. São mencionados de seguida alguns dos sub-produtos obtidos durante este processo: no *Stream Definition* utilizou-se a área mínima de bacia dada

sugerida por defeito: 1.2478 km<sup>2</sup> ou 12478 células; *Stream segmentation*, atribui-se um *value ID* único às células que constituem um mesmo segmento de *stream*; *Cat (raster)*; *Catchment* (vetorial): temos 50 sub-bacias iniciais, que seriam unificadas em 7 anteriormente mencionadas; *AdjointCatchment*: é feita a criação de uma *feature* poligonal com sub-bacias que se vão agregando até à última, que inclui a área total. Após estes passos cria-se o projeto, onde surge uma nova *data frame* e todas as *features* ficam numa *geodatabase*, assim como os *rasters*. O campo *BasinSlope* está em percentagem, e exprime o declive médio de cada sub-bacia. Ao avançar nos procedimentos, definiu-se os seguintes processos de HMS: *Loss Method: SCS*; *Transform Method: Clark*; *Route Method: Lag*. Nos passos seguintes indicou-se o *CN*, que foi carregado para a *data frame*. Correndo também os *Muskingum-Cunge and Kinematic Wave Parameters*. Seguindo os passos anteriores, o *CN lag* foi assim calculado, obtendo os campos *BasinCN* e *BasinLag* (em horas).

Após estes processos através da ferramenta *HecGeo-Hms*, criou-se um *Meteorological Model file*, com a opção de hietograma, apesar de não ser a que se vai utilizar, é a mais aproximada das opções que se encontravam disponibilizadas, finalizando os processos em ambiente ArcGIS realizou-se a criação de um projeto *HMS*.

### 3.4 Modelo meteorológico em HEC-HMS

No desenvolvimento do modelo meteorológico, procedeu-se à importação do *Basin Model* com as sub-bacias definidas com os dados da Tabela 9.

Tabela 9 – Dados de Entrada das Sub-bacias em ambiente HEC-HMS

Sub-bacia	Área km <sup>2</sup>	Loss Method	Transform Method
Rio da Costa	17,183	SCS Curve Number	Clark
Rio de Loures 2	4,5201		
Rio de Loures 3	0,6890		
Ribeira da Póvoa	19,845		
Rio de Loures 1	43,439		
Ribeira de Odivelas	9,0626		
Ribeira Pinheiro de Loures	30,024		

Após a inserção destes dados, procedeu-se a criação do *Meteorological Model*, tendo sido adotado o tipo *Frequency Storm*, onde é definido o tempo do episódio de precipitação intensa que tem em conta o tempo de concentração da bacia de estudo, e o trabalho de Brandão *et al.* (2001) anteriormente referido. Devido à pequena dimensão da bacia do rio de Loures, a duração da chuvada adotada consistiu numa duração entre 30 minutos e 6 horas,

valor em que se enquadra o tempo de concentração das sub-bacias consideradas, porque não tem qualquer benefício considerar uma chuvada maior que aquela a partir da qual toda a bacia já está a contribuir para o caudal.

Tabela 10 – Dados de inserção do Modelo Meteorológico – Frequency Storm

<b>Annual-Partial Conversion</b>	None
<b>Storm Duration</b>	6 Hours
<b>Intensity Duration</b>	5 Minutes
<b>Intensity Position</b>	50 %
<b>Area Reduction</b>	None
<b>Curve</b>	Uniform For All Subbasins

Ainda dentro deste objeto procedeu-se ao preenchimento dos métodos selecionados e referidos anteriormente. Começado pelo método de Clark (tabela 11).

Tabela 11 – Dados de entrada das sub-bacias método de Clark

<b>Sub-bacia</b>	<b>Transform Method (Clark – Time of concentration (hr))</b>	<b>Transform Method (Clark – Storage Coefficient (hr))</b>
Rio da Costa	1,8284	2,92544
Rio de Loures 2	1,7015	2,7224
Rio de Loures 3	0,4492	0,71872
Ribeira da Póvoa	2,1651	3,46416
Rio de Loures 1	3,1199	4,99184
Ribeira de Odivelas	1,7307	2,76912
Ribeira Pinheiro de Loures	2,7678	4,42848

Para cada sub-bacia a impermeabilização foi definida pelo método *Soil Conservation Service Curve Number Loss*.

Tabela 12 – Dados de área impermeabilizada em percentagem em 1995, 2007 e 2018.

<b>Sub-bacia</b>	<b>Loss Method (SCS CN Loss – Curve Number)</b>	<b>Loss Method (SCS CN Loss – Impervious 1995 (%))</b>	<b>Loss Method (SCS CN Loss – Impervious 2007 (%))</b>	<b>Loss Method (SCS CN Loss – Impervious 2018 (%))</b>
Rio da Costa	85,133	44,931	58,814	62,309
Rio de Loures 2	84,082	33,497	38,915	46,510
Rio de Loures 3	85	2,859	3,048	3,048
Ribeira da Póvoa	86,377	41,581	55,075	59,207
Rio de Loures 1	76,997	11,418	12,864	13,500
Ribeira de Odivelas	81,958	48,777	56,968	60,351
Ribeira Pinheiro de Loures	76,461	12,707	13,804	14,728

## Capítulo 4. Resultados e discussão

### 4.1 Evolução do uso e ocupação do solo

Ao longo de 23 anos (1995-2018), verifica-se que a região meridional da bacia hidrográfica teve uma evolução mais dinâmica do uso e ocupação do solo. Isso é mais evidente nas regiões urbanas dos concelhos de Odivelas e Loures. O aumento de territórios artificializados conduz consequentemente a um aumento da área impermeabilizada, fator bastante importante para a ocorrência de cheias (Meneses *et al.*, 2017). De 1995 a 2018 os territórios artificializados (considerando o nível 1 de classificação da COS), tiveram um aumento de 9,6 % da área ocupada na bacia hidrográfica, sendo que 7,3 % de crescimento das áreas urbanas decorreu nos primeiros 12 anos de estudo, entre 1995 e 2007 (figura 11).

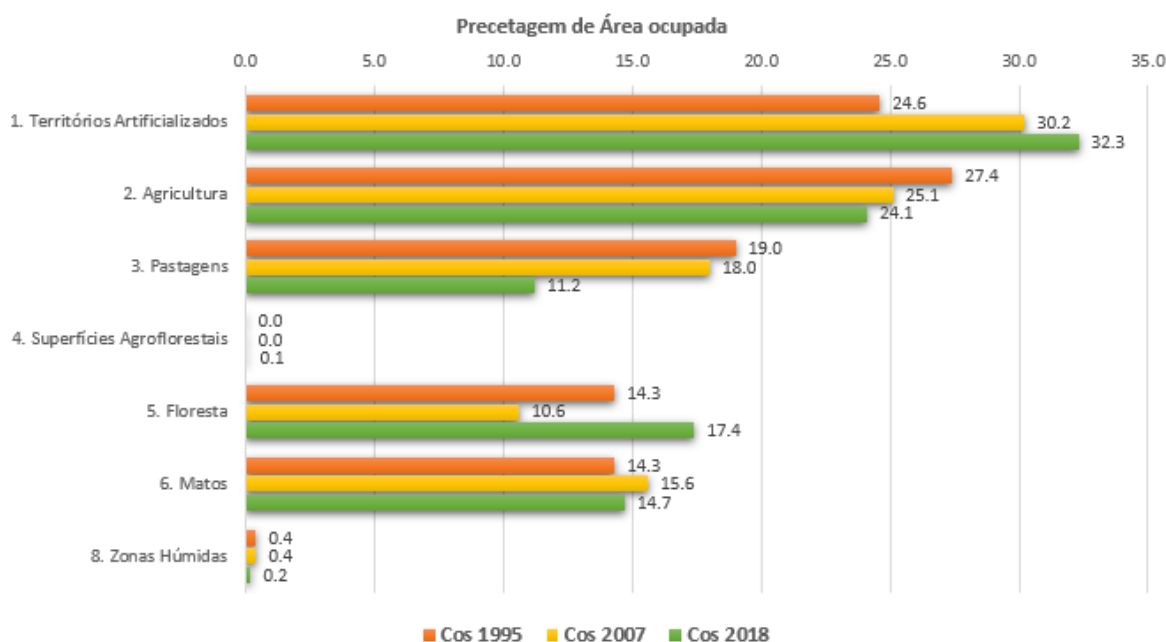


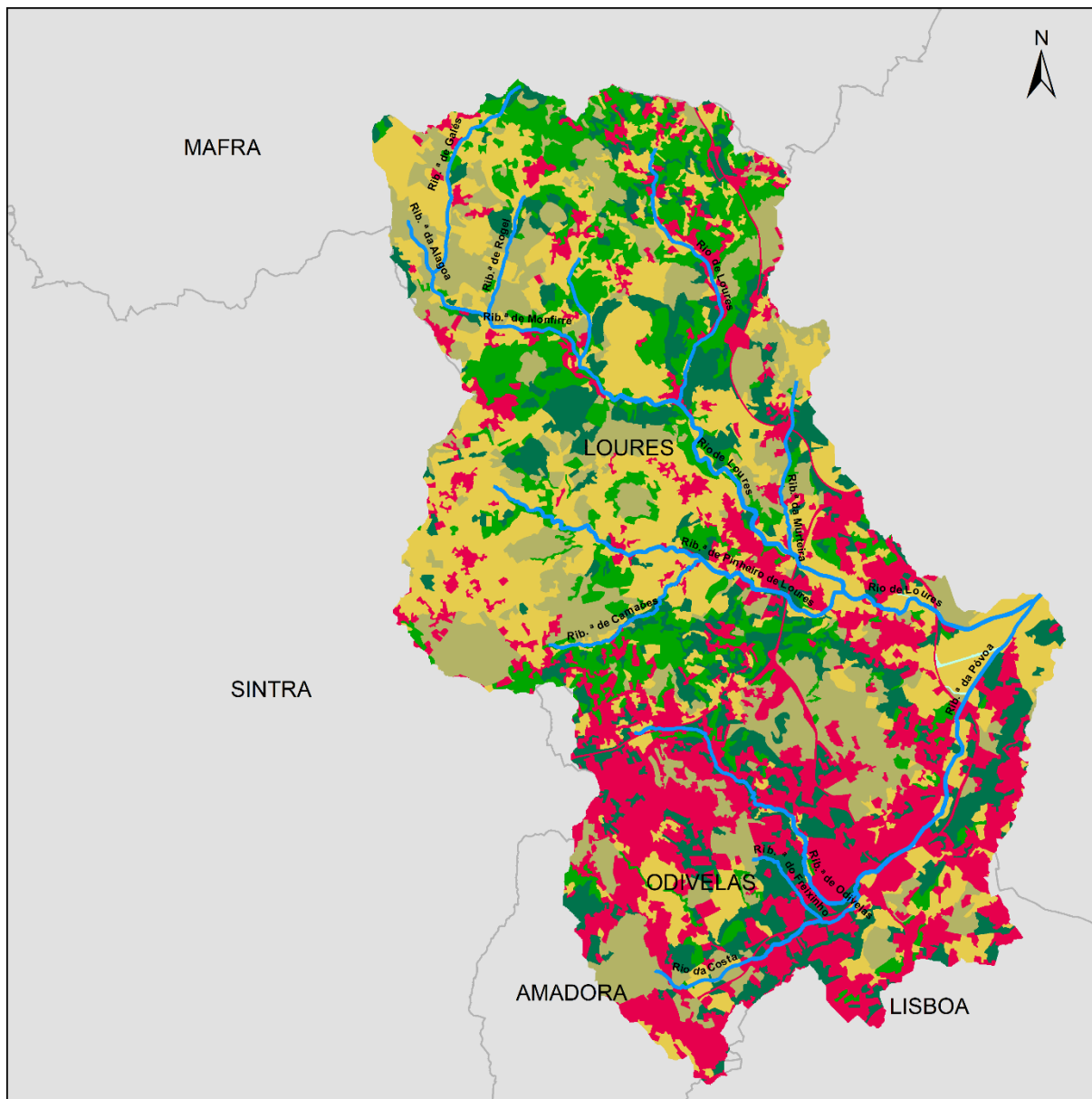
Figura 11 - Evolução do Uso e Ocupação do Solo

Uma tendência que se verifica associada ao aumento dos territórios artificializados, é a diminuição das florestas, pastagens e agricultura, sendo que a área ocupada por espaços florestais, apesar de registarem um aumento de 2007 para 2018, diminuíram no período entre 1995 e 2007 (14,3 % para 10,6 %, respetivamente). As pastagens também tiveram uma diminuição bastante acentuada no período entre 2007 até 2018, de 18,0 %, para 11,2 %. Os matos, ao longo do tempo não tiveram grandes diferenças no que toca à percentagem ao longo do período em estudo, mas a sua distribuição espacial foi-se alterando com o passar dos anos. Esta mudança, sobretudo na região setentrional da bacia, deveu-se ao abandono da agricultura, promovendo um crescimento de vegetação.

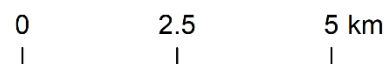
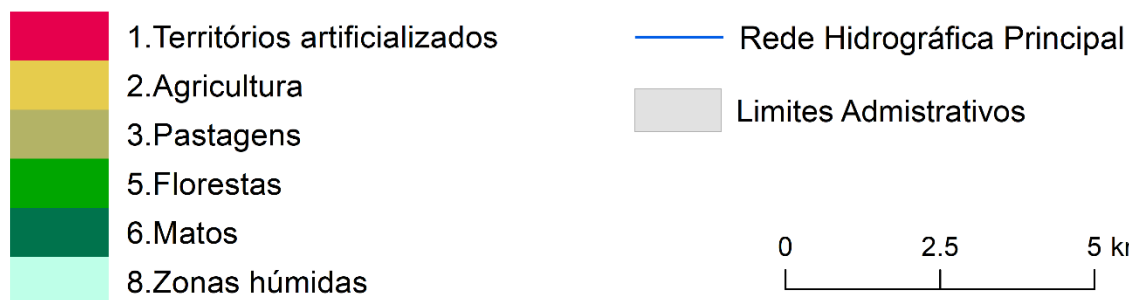
Este uso e ocupação do solo é um fator dinâmico, inconstante a uma escala temporal reduzida face a outros fatores (litologia e morfometria, por exemplo), e que é determinante para o estudo das cheias, sendo este o propósito do presente trabalho, demonstrar a importância deste na ocorrência de cheias. Analisando o uso e ocupação do solo na área de estudo, dividimos este estudo por três períodos diferentes, esta assentou com base na informação da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) da DGT, de 1995, de 2007 e 2018.

Posto isto, irá iniciar-se a análise dos três períodos, que entre si têm um intervalo de 23 anos, começando por 1995. Com recurso à figura 12, pode-se observar que os territórios artificializados se concentram, na sua maioria, na parte sul da bacia hidrográfica (24,6 %). Desta classe podem-se destacar as urbanizações do centro de Odivelas, do Senhor Roubado e Olival Basto, bem como o centro histórico de Loures. A norte, verifica-se um solo pouco ocupado por terrenos artificializados, havendo uma maior expressão de floresta, agricultura, pastagens e matos, sendo que a ocupação do solo destas classes corresponde respetivamente a 14,3 %, 27,4 %, 19 % e 14,3 %. Ainda ressaltar que a zona húmida tem pouca percentagem de ocupação solo da bacia com apenas 0,4 %.

Passando para o ano de 2007, a região em 12 anos teve um aumento de aproximadamente 6 % de territórios artificializados que podem ser justificados pelo abandono da agricultura e a ocupação das pastagens na área de estudo, sendo que neste intervalo de 12 anos aqueles dois tipos de ocupação passaram de aproximadamente 19 % para 1,6 %. Contudo, as florestas tiveram um grande desenvolvimento nas áreas mais a Norte e centro da bacia hidrográfica em estudo. Matos e zonas húmidas não registam alterações significativas no uso e ocupação do solo.

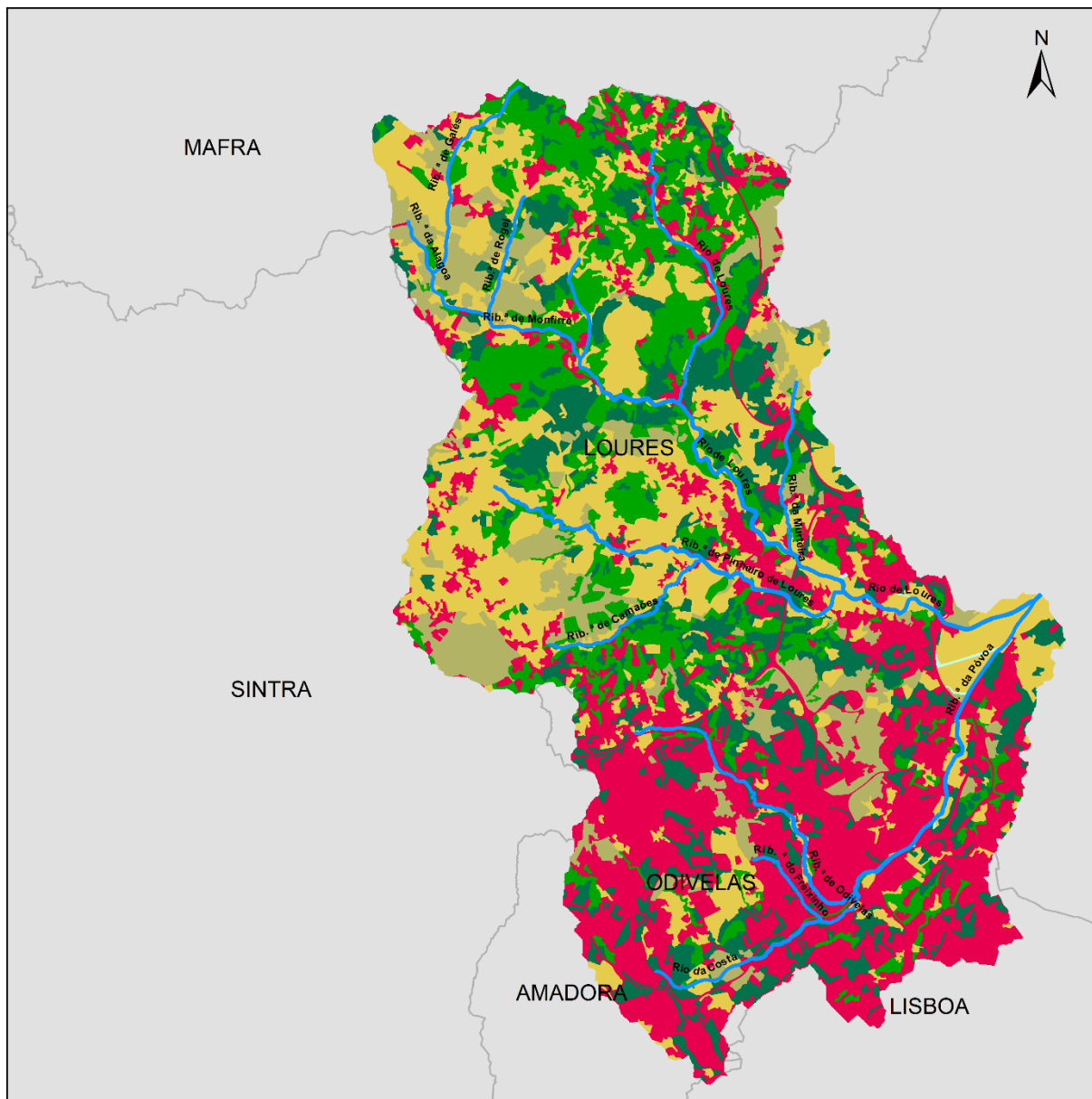


### Nomenclatura COS 1995

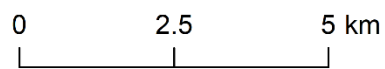
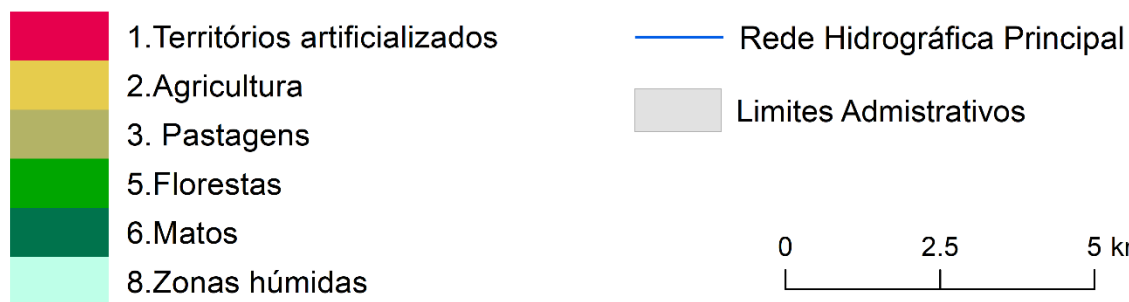


Sistema de Coordenadas:  
ETRS 1989 Portugal TM06

Figura 12 - Carta de Uso e Ocupação do Solo (1995)



**Nomenclatura COS 2007**



Sistema de Coordenadas:  
ETRS 1989 Portugal TM06

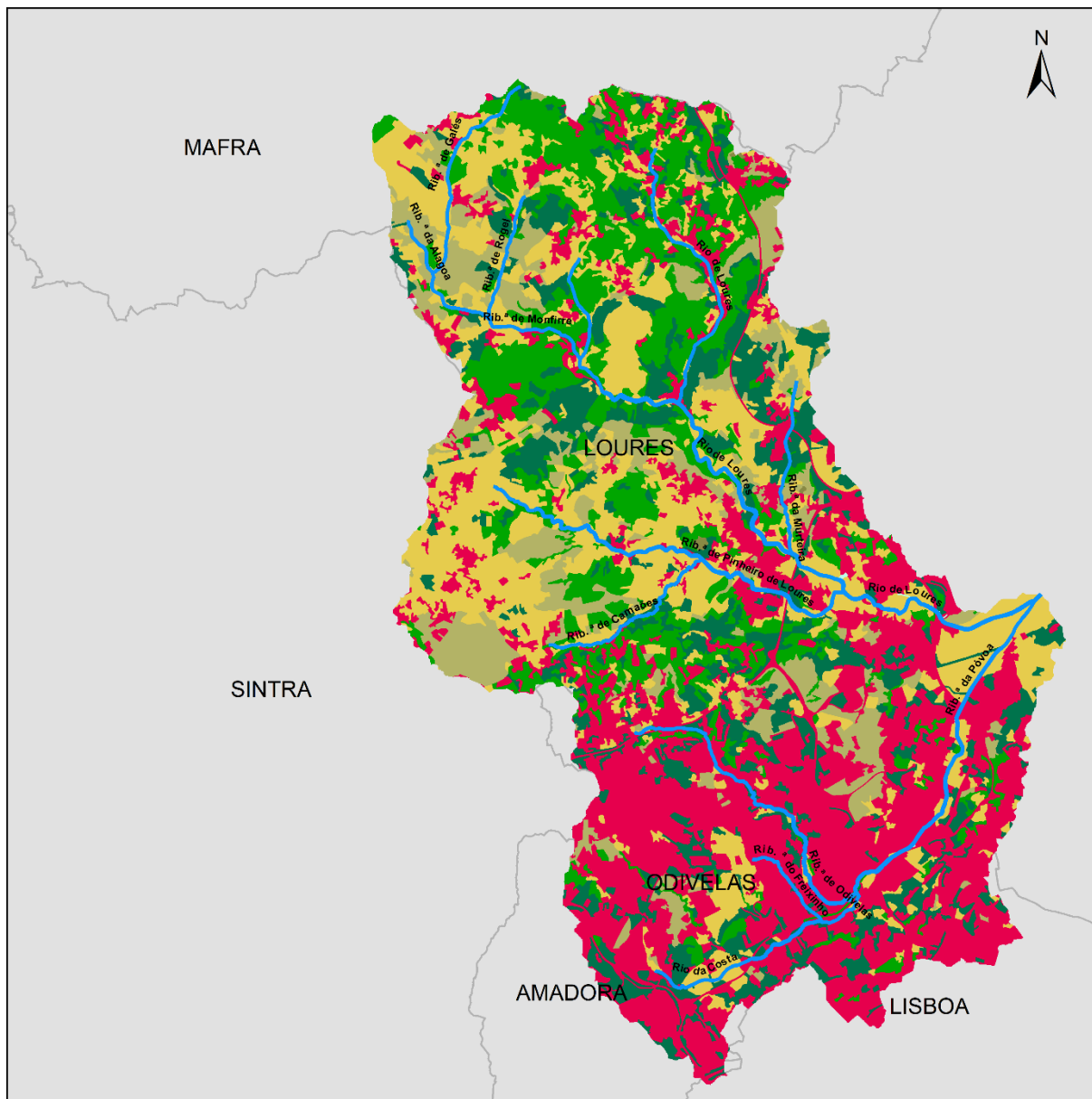
Figura 13 - Carta de Uso e Ocupação do Solo (2007)

Chegando mais perto da atualidade, no ano de 2018, como se pode observar na figura 14, cada vez mais a predominância de territórios artificializados é maior, sendo que neste período corresponde a cerca de 32,33 % da área de estudo, onde o crescimento de Odivelas e Loures é notório ao longo do período de estudo, como se pode verificar na figura 14, no Sul da bacia hidrográfica. A agricultura teve um decréscimo quase insignificante, comparativamente a 2007.

É evidente um aumento das pastagens que passaram de 1,6% para 11,2 %, um aumento bastante elevado num período de 11 anos. Destaca-se também, o surgimento de superfícies agroflorestais na bacia, apesar de ser uma porção insignificante com apenas 0,1 % de ocupação do solo. As florestas tiveram uma grande diminuição da área ocupada, mas continuam a concentrar-se a Norte e centro da bacia.

Tendo em conta o histórico de ocorrências de cheias da base dados DISASTER, onde contabilizamos 33 ocorrências antes de 1995 com início de 1865, e depois de 1995 até 2008 ocorreram 8 cheias apenas. Apesar do aumento de artificialização do solo a ocorrência é menor. Contudo este dado pode ser enganador, na medida em que a preocupação com este fenómeno nos dias que correm é maior, e já foram executados alguns projetos de requalificação de vários cursos de água presentes nesta bacia hidrográfica, que podem explicar a menor frequência deste fenómeno perigoso.

Para além das ocorrências referidas ao longo do trabalho, é de salientar que durante a produção do mesmo ocorreram dois eventos de cheia, nos dias 7 e 13 de dezembro de 2022, que segundo um comunicado da câmara municipal de Odivelas, causaram prejuízos superiores a 6 milhões de euros, onde 62 famílias necessitaram de ajuda do fundo de auxílio social de emergência do município.



**Nomenclatura COS 2018**

- 1. Territórios artificializados
- 2. Agricultura
- 3. Pastagens
- 4. Superfícies agroflorestais
- 5. Florestas
- 6. Matos
- 8. Zonas húmidas

Rede Hidrográfica Principal

Limites Administrativos

0                      2.5                      5 km

Sistema de Coordenadas:  
ETRS 1989 Portugal TM06

Figura 14 - Carta de Uso e Ocupação do Solo (2018)

## 4.2 Modelação hidrológica com o programa HEC-HMS

Após a introdução dos dados no programa HEC-HMS, foram realizadas simulações de um episódio de precipitação intensa, associado a um período de retorno de 100 anos (Brandão *et al.*, 2001), para que se consiga observar as diferenças que o uso e ocupação do solo tiveram na formação dos caudais de ponta de cheia, e nos hidrogramas de cheia, ao longo do período em análise.

Nestas simulações, foram utilizados os dados referidos na parte III da presente dissertação, tendo havido uma distinção das três simulações. A área impermeabilizada foi alterada para os valores correspondentes ao período que estava a ser simulado.

Posto isto, através das figuras 11,12,13 e 14, é possível compreender que nesta sub-bacia, no que toca a capacidade de infiltração esta é elevada, sendo que, a bacia Rio de Loures 1, é a que apresenta uma menor taxa de impermeabilização do território em estudo. Esta condição deve-se ao facto de ser a bacia com menos áreas artificializadas na sua extensão, sendo esta composta maioritariamente por florestas, matos e zonas agrícolas e/ou de pastagens.

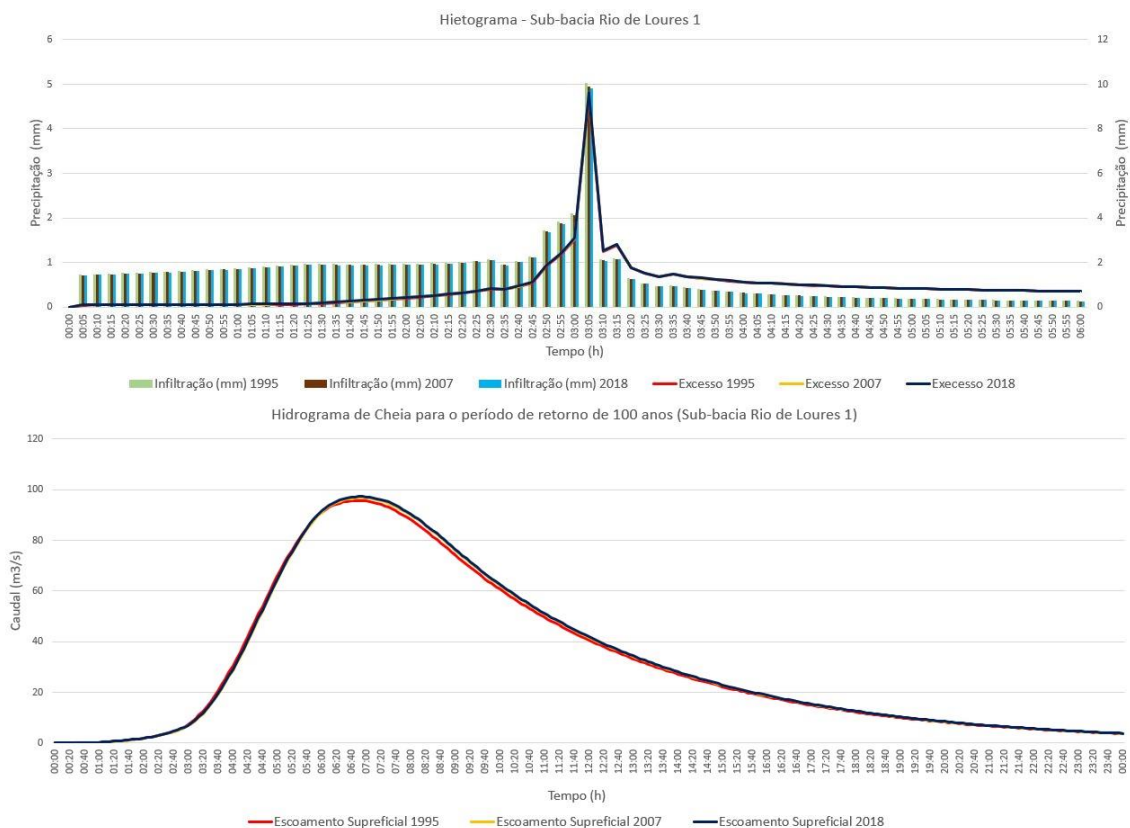


Figura 15 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Rio de Loures 1

Além desta característica, esta é também a bacia com maior extensão em km<sup>2</sup>, sendo que dos seus 43,439 km<sup>2</sup> só 13,5 % é que contém áreas com elevada impermeabilização. Esta bacia, pelas suas características, tem um escoamento superficial elevado, apesar de ser das bacias com maior proporção de solos permeáveis, o que também pode ser explicado por ser a bacia com o maior número de cursos de água.

Quanto a bacia da ribeira de Pinheiro de Loures, é tal como a do rio de Loures 1, é das que tem maior extensão, com cerca de 30,024 km<sup>2</sup>, esta também possui um território maioritariamente composto por áreas permeáveis, sobretudo pastagens e matos.

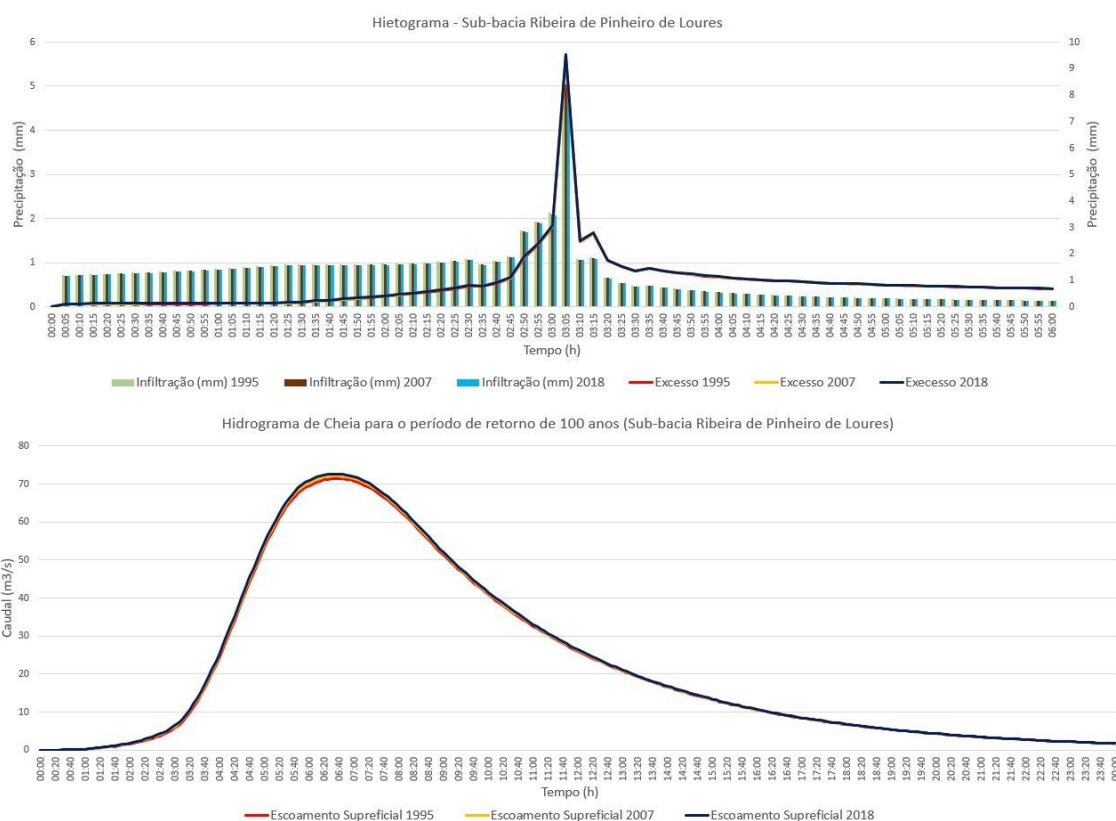


Figura 16 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Ribeira de Pinheiro de Loures

A sub-bacia possui igualmente um escoamento superficial com um caudal de ponta de cheia superior à média da bacia hidrográfica do rio de Loures, explicado por ter uma área relativamente superior às restantes, bem como um declive médio acentuado. Sendo que ambas as bacias hidrográficas, rio de Loures 1 e a ribeira de Pinheiro de Loures, encontram-se em setores com cotas elevadas e áreas de declive acentuado, onde os cursos de água direcionam-se para o fundo de vale, o que as torna as duas grandes sub-bacias que alimentam o curso de água principal em estudo.

Já a bacia da ribeira de Odivelas, tem uma capacidade de infiltração reduzida sendo que a mesma não chega a 2 mm, como consequência da incapacidade para a água se infiltrar no solo, o tempo de concentração da bacia hidrográfica é menor.

Comparando as duas bacias anteriores, demoram aproximadamente 6 horas para ocorrer acumulação máxima de caudal no curso de água, a ribeira de Odivelas demora apenas 4 horas e 55 minutos. Nesta acumulação de caudal em termos brutos há uma menor concentração de caudal, mas em termos proporcionais é bastante elevado, devido ao facto de a bacia ter uma dimensão mais reduzida, com cerca de 9,062 km<sup>2</sup>, sendo que, as outras bacias são as que têm menor caudal específico aproximadamente 2 m<sup>3</sup>/s, e a da ribeira de Odivelas tem praticamente o dobro, sendo o valor do caudal específico 4,46 a 4,71 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> ao longo dos anos de estudo.

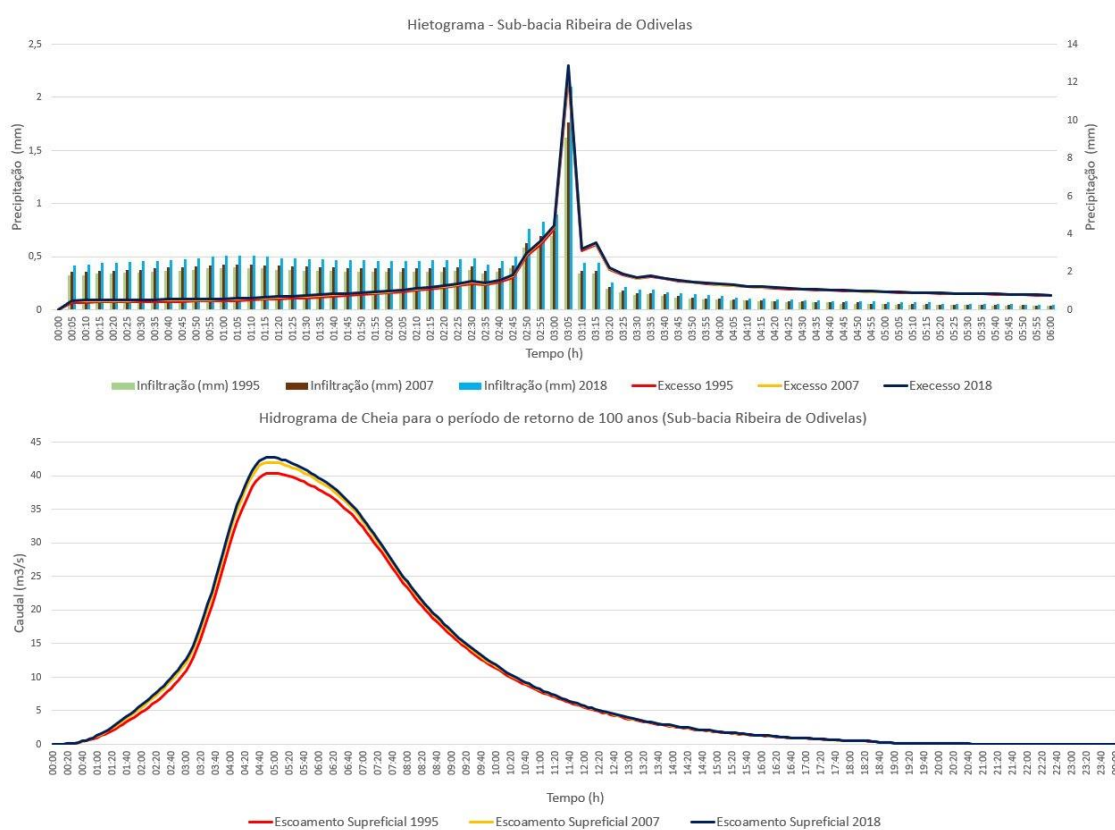


Figura 17 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Ribeira de Odivelas

A bacia da ribeira da Póvoa é a terceira maior que está a ser estudada, esta apresenta o terceiro maior tempo de concentração, e apesar de grande parte desta bacia se encontrar no fundo de vale, tendo assim pouco declive médio, acumula grandes proporções de água.

Esta é a bacia que tem o segundo maior escoamento superficial, e nesta podemos verificar que com a grande artificialização que ocorreu, principalmente nas localidades do Senhor Roubado e Olival Basto que aqui se inserem, o tempo de concentração reduz-se,

diminuindo-se o tempo de resposta. A menor capacidade de infiltração conduz igualmente ao aumento significativo do caudal de ponta de cheia e do caudal específico.

O comportamento desta bacia é de realçar, pois esta já se encontra perto do fim do ciclo do escoamento, estando muito próxima da desembocadura do curso de água, e tendo por isso um caudal de ponta elevado pois esta é alimentada pela confluência das bacias da ribeira de Odivelas e do rio da Costa.

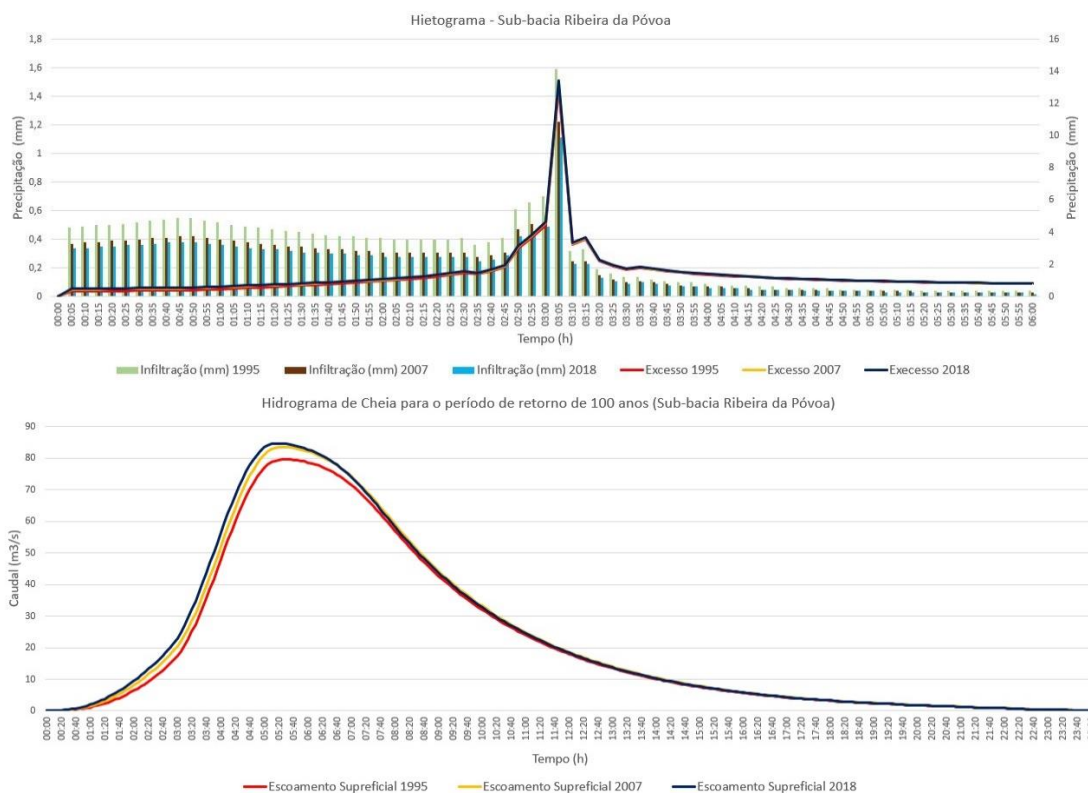


Figura 18 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Ribeira de Póvoa

Quanto à sub-bacia do rio de Loures 2, esta é caracterizada pela junção da ribeira de Pinheiro de Loures com o rio de Loures. Tem uma dimensão reduzida, cerca de 4,52 km<sup>2</sup> esta é também uma bacia que tal como a ribeira da Póvoa, possui uma acumulação vasta de água devido as confluências presentes na mesma.

Dispõem de uma capacidade de infiltração baixa, é uma zona com alguma artificialização, sendo que, nesta sub-bacia é onde se localiza a cidade de Loures, cidade esta que teve um crescimento acentuado, no que toca à percentagem de área artificializada desde 1995 até 2018. A desembocadura desta bacia é onde existe a confluência entre a ribeira da Póvoa e o rio de Loures, região que já foi bastante assolada por cheias provocadas por grandes precipitações de água.

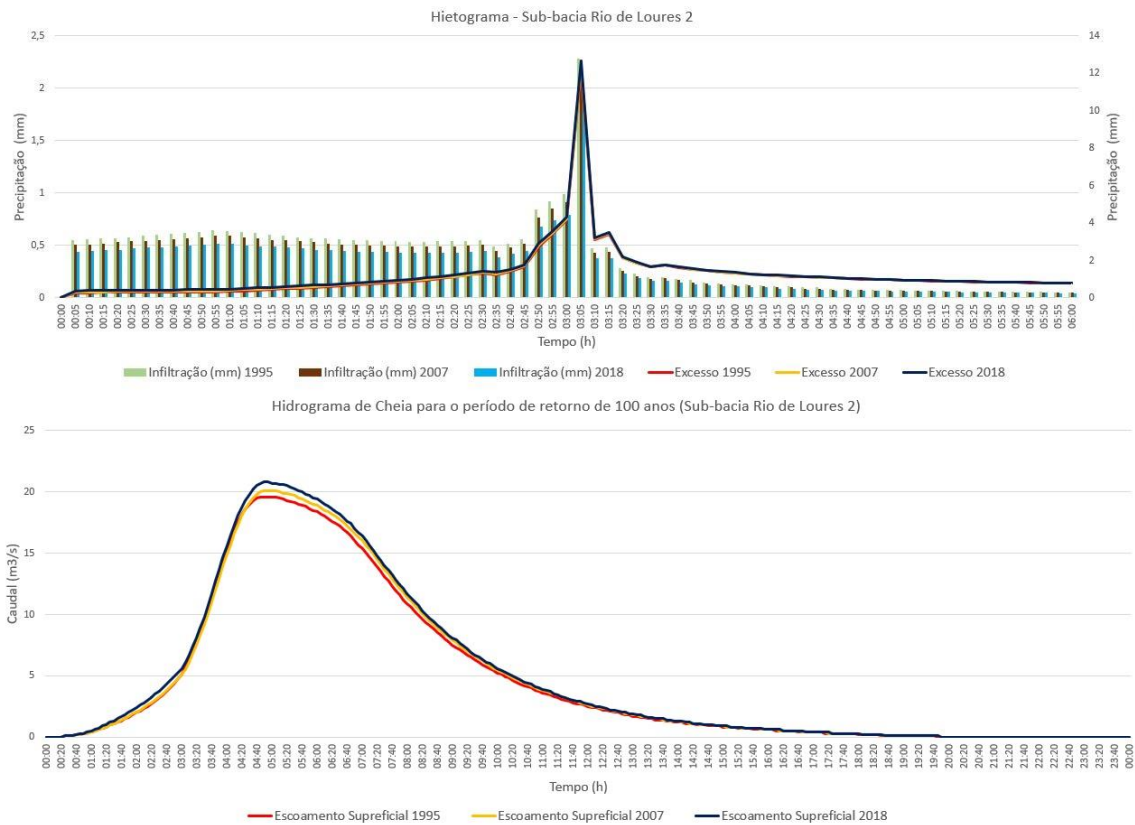


Figura 19 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Rio de Loures 2

A bacia mais próxima da desembocadura é então a do rio de Loures 3, bacia localizada na várzea de Loures, próxima do parque da cidade de Loures e da localidade de ponte de Frielas, locais estes que já foram afetados no passado por episódios de cheias.

Por esse motivo, esta região já teve uma intervenção para mitigar e prevenir a ocorrência de cheias e reduzir os seus impactos, através da implementação dos canais artificiais de Loures.

Esta bacia é bastante pequena, não chega a ter 1 km<sup>2</sup>, devido a este facto, a mesma tem um tempo de concentração bastante baixo, sendo que o caudal de ponta de cheia é atingido em três horas e trinta minutos, que comparando com as restantes bacias é de facto um tempo muito abaixo da média.

O seu tempo de resposta é reduzido, em apenas oito horas o curso de água tem a sua normalização, pode-se considerar um impacto positivo a existência dos canais artificiais implementados. Além de que a capacidade de infiltração desta bacia é boa, estando ligeiramente acima da média, por não ter muitas áreas artificializadas, apenas 3% desta bacia é artificializada permitindo assim uma infiltração mais eficiente.

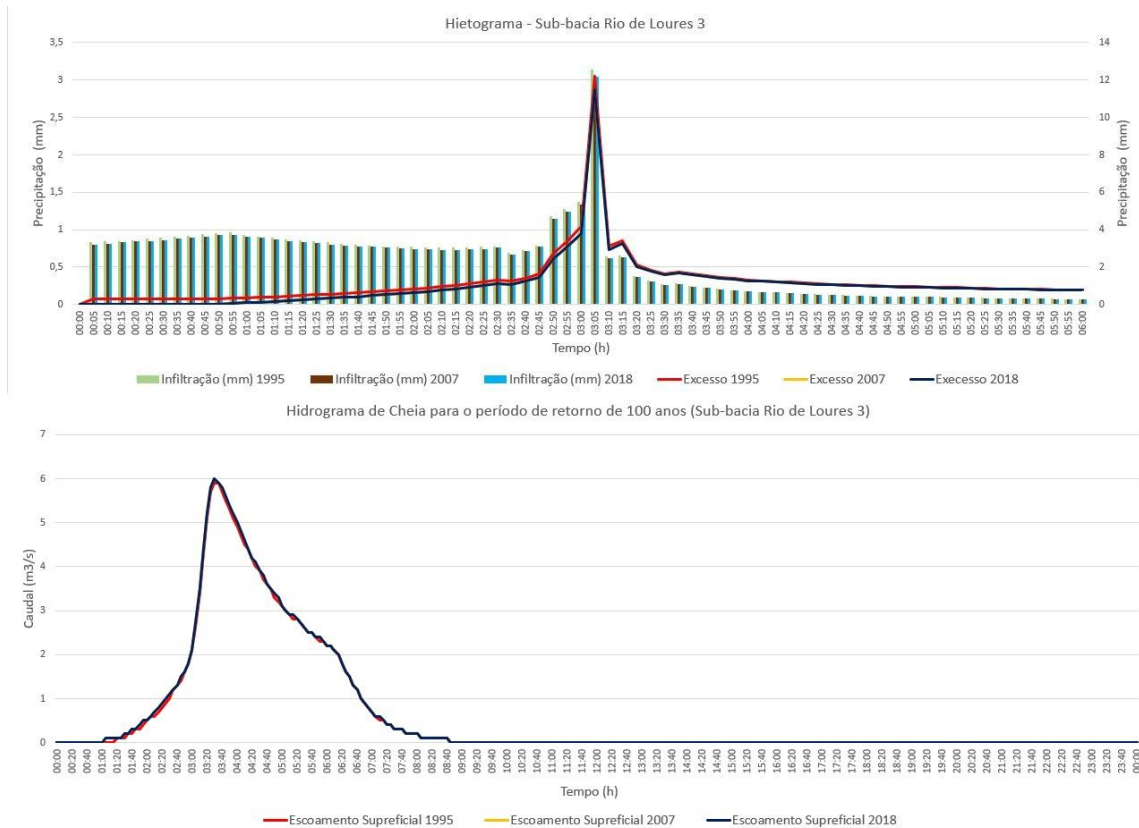


Figura 20 – Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Rio de Loures 3

Uma das principais bacias, e que tem maior contribuição de escoamento superficial no ciclo de vida de um episódio de cheia na área de estudo, é a bacia do rio da Costa, bacia esta com uma área de 17,183 km<sup>2</sup>, e é a que tem o segundo tempo mais rápido de concentração de apenas 4:50 a 5:00 horas nos vários períodos temporais.

Em termos de uso e ocupação do solo é uma bacia com baixa capacidade de infiltração, esta deve-se ao facto de ser a bacia com maior área artificializada em 2007 e 2018, com 58,81 % e 62,31 % respetivamente, fator este determinante para a capacidade de infiltração do solo.

Contudo, esta tem um caudal específico pouco acima da média com 4,74 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> em 2018, uma justificação para tal facto, é que esta está no início do ciclo de escoamento de toda a área de estudo, logo não há acumulação de escoamento de outros cursos de água principais para que haja um escoamento descontrolável. Apesar desta região ter sido intervencionada, houve uma regularização hidráulica do rio da Costa, onde se construiu zonas de amortecimento a montante do curso de água, reduzindo assim os caudais, para que diminuam as ocorrências de cheias nas zonas junto ao leito do rio. Ainda foi introduzida vegetação ripícola para que ocorra uma fixação avifauna e estabilização das margens.

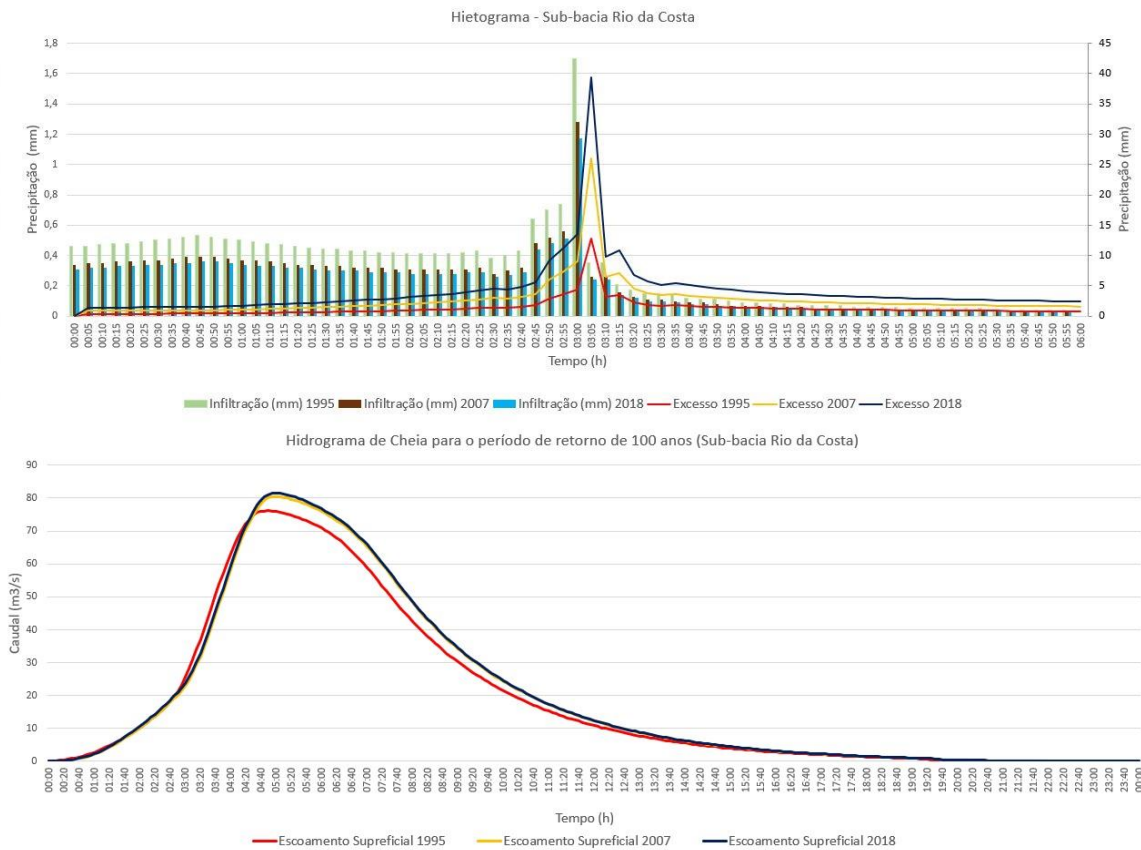


Figura 21 - Hidrogramas de Cheia e Evolução dos caudais de Ponta de Cheia – sub-bacia Rio da Costa

Com recurso à tabela 12, conseguimos comparar os vários dados das diferentes sub-bacias em estudo. Percebe-se que as baicas de maior declive, são as que apresentam maior caudal de ponta de cheia nos vários períodos temporais estudados, e que são igualmente as que têm maior dimensão, contudo entre estas ainda existem diferenças.

A bacia do rio de Loures 1 e da Ribeira de Loures, são igualmente bacias de grande dimensão e com um declive médio relativamente elevado, tem tempos de concentração elevados já depois das 6 horas, mas também tem tempos de resposta altos, facto que se deve há grande quantidade de cursos de água consideráveis onde ocorre um grande escoamento durante episódios de precipitação intensa.

Outra característica que é semelhante no mesmo tipo de bacias, é o tempo de resposta mais baixo, por norma as bacias com esta característica, têm uma maior artificialização que faz com que o tempo de concentração do caudal seja mais reduzido do que as restantes, por ocorrer uma infiltração pouco eficiente pelos solos que compõe a bacia, são pouco permeáveis. Exemplos deste tipo de bacias são a bacia do rio da Costa, a bacia da ribeira de Odivelas e a da ribeira da Póvoa, bacias, estas onde mais de 60% da sua extensão é ocupada

por áreas artificializadas, aumentando assim o escoamento superficial despoletando mais facilmente a ocorrência de um episódio de uma cheia rápida.

Tabela 13 – Matriz de características das sub-bacias hidrográficas estudadas

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	TR (h:min)			Caudal de ponta (m <sup>3</sup> /s)			Caudal específico (m <sup>3</sup> /s//km <sup>2</sup> )			Área artificializada (%)			Declive (°)
		1995	2007	2018	1995	2007	2018	1995	2007	2018	1995	2007	2018	
-	-													-
Rio da Costa	17,18	04:50	05:00	05:00	76,2	80,4	81,5	4,4	4,7	4,7	44,9	58,84	62,34	7,32
Rio de Loures 2	4,52	04:45	04:50	04:50	19,6	20,1	20,8	4,3	4,4	4,6	33,59	39,03	46,68	4,43
Rio de Loures 3	0,69	03:30	03:30	03:30	5,9	6,0	6,0	8,6	8,7	8,7	2,87	3,03	3,03	6,08
Ribeira da Póvoa	19,85	05:25	05:25	05:20	79,6	83,5	84,7	4,0	4,2	4,3	41,56	55,03	59,18	6,25
Rio de Loures 1	43,44	06:45	6:50	6:50	95,7	96,8	97,3	2,2	2,2	2,2	11,42	12,86	13,5	11,13
Ribeira de Odivelas	9,06	04:55	4:50	4:50	40,4	42	42,7	4,5	4,6	4,7	48,77	56,95	60,31	8,87
Ribeira Pinheiro de Loures	30,02	06:35	6:30	06:35	71,5	72,1	72,7	2,3	2,4	2,4	12,71	13,81	14,74	9,10

Numa visão geral, com recurso à tabela 13, a bacia do rio de Loures tem tido um aumento de área artificializada, sendo que, na passagem para os anos 2000 deu-se a maior alteração de percentagem. Este fenómeno pode ser visualizado nas figuras 12, 13 e 14, observando assim as mudanças do uso e da ocupação do solo. Compreende-se que ocorre um crescimento nas áreas urbanas junto a Odivelas, Caneças, Olival Basto, Póvoa de Santo Adrião e Loures, locais que nos dias de hoje têm grandes concentrações populacionais, que no passado já foram expostas a ocorrências de cheias. Este aumento tem como consequência a grande impermeabilização do Sul da bacia hidrográfica, tendo em conta o seu histórico, esta foi assolada mais vezes por cheias, que a Norte da bacia.

O aumento gradual das áreas artificializadas tem como consequência a redução da capacidade de infiltração da água nos solos, aumentando assim o caudal de ponta de cheia, bem como a diminuição do tempo de reposta da bacia hidrográfica. Atente-se, contudo, que o tempo de resposta nos anos mais recentes é superior a 1995 pelo facto de o hidrograma de cheia ainda estar em crescimento, o que significa que maior impermeabilização não se traduz numa redução do tempo de resposta, mas sim no aumento do caudal de ponta de cheia.

Uma explicação para este facto que podem ser as intervenções que ocorreram no rio da Costa no ano de 2006 e 2007, com as estruturas de amortecimento implementadas e os entalhes do rio mais cavados, permitindo um melhor escoamento e diminuição da propensão para a acumulação de água em certos locais do curso de água onde anteriormente se acumulava.

Tabela 14 – Dados hidrométricos da sub-bacia do rio de Loures (1995, 2007 e 2018)

Ano	Caudal de ponta (m³/s)	Caudal específico (m³/s/km²)	% Área artificializada	TR
1995	369,6	2,96	24,6	06:00
2007	379,7	3,04	30,2	06:05
2018	383,7	3,08	32,3	06:05

Durante a análise das várias sub-bacias foi possível identificar dois troços onde existe a confluência de cursos de água que podem ter maior predisposição à ocorrência de cheias, pois consistem em fundos de vale onde há junção de caudais, cujas bacias drenantes apresentam distintos usos e ocupações do solo.

Estes troços são: o R290 que se encontra na sub-bacia de Loures 2, onde o caudal da sub-bacia de Loures 1 e da ribeira de pinheiro de loures se vão encontrar, acumulando assim os caudais num curso de água só. Já o R340 está inserido na sub-bacia da ribeira da póvoa, este troço recebe o caudal proveniente de montante do rio da costa e da ribeira de Odivelas, e encontra-se numa região com maior artificialização do que o anterior.

Através da figura 22, é possível perceber que a sub-bacia, em concreto, em que o troço R290 se insere regista um valor baixo de caudal específico nos vários anos. Isto deve-se ao facto de a área onde está inserido ser grande, sendo que o caudal específico é de 2,40 m³/s no ano de 1995, tendo este aumentado ligeiramente com passar dos anos devido à baixa artificialização do território nesta área.

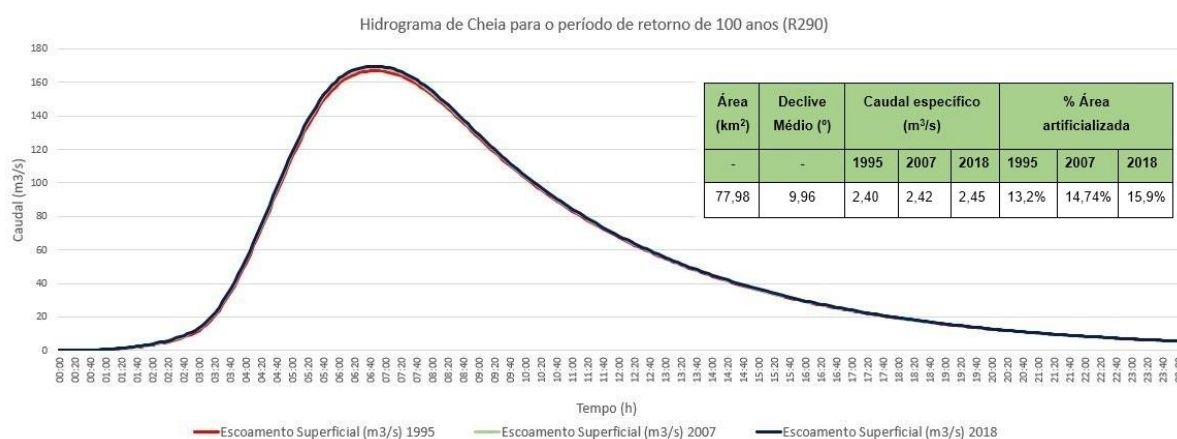


Figura 22 – Hidrograma de cheia no final do troço R290

A grande problemática deste troço R290 advém da baixa capacidade de infiltração junto do local de confluência, devido à sua artificialização elevada do mesmo. Este encontra-se na cidade de Loures, onde o crescimento urbano tem sido acentuado entre 1995 e 2018.

A R290 é pouco declivosa, mas como o caudal é elevado podem ocorrer cheias, caso haja uma elevada precipitação.

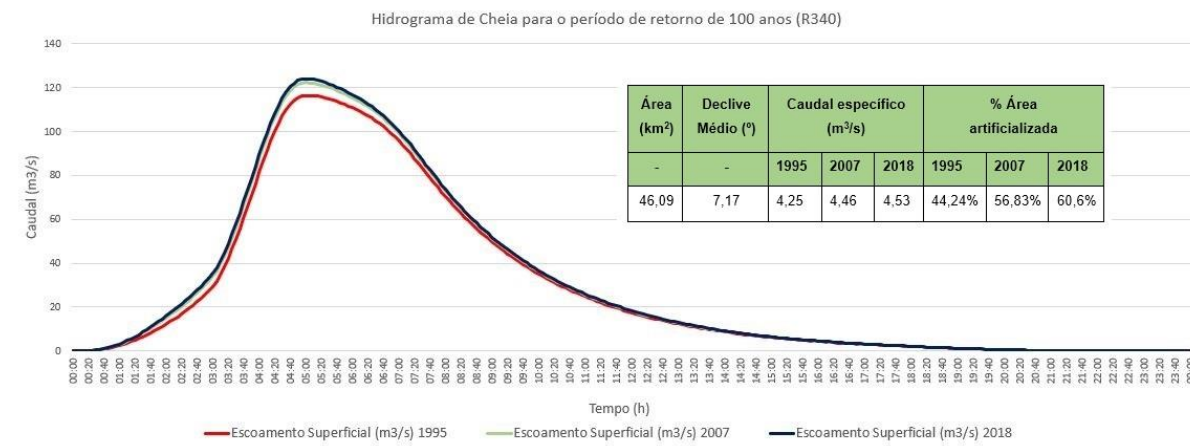


Figura 23 – Hidrograma de cheia da zona R340

O troço R340 apresenta características totalmente distintas do R290. O troço R340 é menos extenso e tem associada uma área com cerca de 46,09 km<sup>2</sup>, sendo a bacia onde ocorre a confluência, um pouco mais declivosa no seu total, tendo algumas vertentes do lado oeste e este da sua extensão. O troço está inserido na sub-bacia da Ribeira da Póvoa, recebendo os caudais do Rio da Costa e da Ribeira de Odivelas, vindas de montante, com caudais elevados, e provenientes de áreas bastante artificializadas, no caso desta 60,6 % da sua área está artificializada.

Estas áreas tiveram um maior crescimento, a diferença entre os vários anos é de 17,62%, no período que foi estudado. E com um caudal específico maior esta zona tem uma maior predisposição à ocorrência de cheias maior que o R290, tanto que o mesmo pode ser confirmando pelo histórico representado na figura 23.

## Capítulo 5. Considerações finais

Durante o desenvolvimento da presente dissertação foram surgindo alguns constrangimentos que influenciaram quer o caminho que foi traçado, quer algumas decisões metodológicas assumidas durante a realização do projeto.

Um desses constrangimentos foi, por exemplo, a falta de dados de grande escala, por exemplo de escala superior a 1:2000, com altimetria (pontos cotados e de curvas de nível), para que o detalhe do modelo digital de elevação fosse maior e, conseqüentemente, o desenvolvimento e a definição das sub-bacias, e do modelo hidrológico fossem o mais precisos possível. Contudo, chegou-se a um modelo geométrico próximo da realidade, com os dados utilizados, considerando a sua aplicação para modelação hidrológica. Caso se pretendesse proceder a modelação hidráulica, a escala 1:10.000 utilizada não seria a mais adequada.

Em complemento aos dados relativos às curvas IDF disponíveis em INAG (2001), teria sido útil dispor de dados obtidos por uma estação hidrométrica localizada, num setor intermedio ou terminal da bacia. Esses dados permitiriam modelar com maior exatidão a relação entre a precipitação e o escoamento.

De referir ainda a falta de dados representativos do escoamento de base, ou seja, dos processos de infiltração profunda, que neste modelo hidrológico não foram considerados. Tratando-se de uma bacia suscetível sobretudo a processos de cheia rápida, esta limitação condiciona menos os resultados do que se se tratasse de uma bacia sujeita a processos de cheia progressiva. A dinâmica do uso e ocupação do solo têm conseqüências no quotidiano da nossa vida. O seu planeamento deve ser rigoroso e bem implementado, para que não ocorram implicações negativas nas populações e nas atividades económicas. Tal planeamento deverá contribuir para a redução ou, no mínimo, a estabilização das áreas expostas a fenómenos perigosos. No passado, ocorreram erros resultantes de um desconhecimento do território, que se traduziu num agravamento das condições de escoamento e na ocupação dos leitos de cheias de cursos de água, colocando em causa as estruturas que foram implementadas e as populações que lá residem ou trabalham.

Com esta dissertação foi possível compreender que a região de Odivelas e Loures, tem registado alterações ao uso e ocupação do solo que acentuam os caudais de cheia na maioria das sub-bacias hidrográficas. Ao longo do tempo os fatores condicionantes do escoamento, associados ao uso e ocupação do solo, foram sendo agravados, o que pode ser

prejudicial para a ocorrência de cheias nestes concelhos. As câmaras municipais, bem como, a proteção civil e os seus agentes, devem estar atentos ao território habitado e utilizado, por um lado, e ao território porventura não habitado nem utilizado, mas onde se geram os processos de escoamento. A alteração das características do território pode torná-lo mais ou menos propenso à geração de caudais que conduzam a cheias.

De modo a não agravar os erros de ocupação do solo que incrementam os valores extremos de caudal, as entidades com competências na gestão do território devem atender a estudos da natureza daquele aqui apresentado. A sua atuação deve focar-se nas condições de escoamento, tais como a morfometria, a litologia, os solos, o coberto vegetal e o uso e a ocupação do solo, refletidas em instrumentos como os PDM.

Segundo a constituição da república portuguesa, o ordenamento do território é uma tarefa do estado. Cabe a este definir a valorização e a proteção do património e dos recursos naturais através do mesmo. É igualmente sua missão promover um desenvolvimento harmonioso de todo o território nacional. Não cabe ao ordenamento do território salvar pessoas pois o seu objetivo é prevenir situações que coloquem em risco.

Não sendo possível no curto e médio prazo corrigir os erros de uso e ocupação do solo, as estimativas do comportamento dos caudais de ponta de cheia constituem um resultado aplicável no âmbito da Proteção Civil. O agravamento de caudais de ponta de cheia observado, em particular nas sub-bacias da ribeira de Odivelas, da ribeira da Póvoa e do Rio da Costa, poderá ser útil na implementação de sistemas de aviso e alerta e na definição de procedimento de intervenção nas fases de emergência nas áreas mais críticas.

Na bacia analisada, e no período de estudo não se verificou um crescimento homogéneo da artificialização do território. Nas sub-bacias da ribeira de Odivelas, da ribeira da Póvoa e do Rio da Costa, ocorreu uma impermeabilização superior às restantes. Curiosamente é também nestas áreas que ocorreram mais eventos de cheia, segundo a base de dados DISASTER. Tendo em conta a litologia e os solos destas áreas (onde decorreram as cheias) não existe uma diferença dos fatores naturais que influenciam o escoamento.

Desta forma, podemos concluir que de facto, os fatores antrópicos, no caso o uso e ocupação do solo implementados de forma indevida e com a artificialização do território, aumentam os caudais máximos dos hidrogramas de cheia e podem aumentar a predisposição das sub-bacias para a ocorrência de cheia.

Com a aprovação da lei de bases da proteção civil (Decreto de lei n.º 80/2015), é conferida ao Estado a responsabilidade de prevenir os riscos e os danos causados pelos

fenómenos extremos, como as cheias. Quando já não é possível prevenir, pelo menos, devem-se atenuar os danos causados. Este objetivo é contraditório com o que se vê no terreno em prática.

Tal como referido anteriormente as câmaras municipais e a Proteção civil deviam realizar um levantamento dos locais onde ocorrem fenómenos perigosos, de forma que se preveja a ocorrência destes e se identifiquem os fatores desencadeantes, que lhes dão origem. Uma abordagem preventiva deve preferida a abordagens reativas.

Um dos objetivos principais deste trabalho foi contribuir para a compreensão da existência da ligação do planeamento com o domínio das alterações do uso e ocupação do solo, com a ocorrência de cheias, permitindo uma avaliação do impacto do planeamento estratégico do território na alteração do mesmo. Por vezes, houve negligência da influência que este tem, esta situação advém da ideia de que os fatores naturais sempre foram responsáveis e influenciaram as alterações do uso e ocupação do solo e na ocorrência de fenómenos perigosos. Contudo, nos últimos anos estes comportamentos têm-se vindo a modificar, priorizando políticas que privilegiem esta interligação entre o planeamento, as características dos solos e a ocorrência de cheias.

Numa fase inicial os estudos das alterações do uso e ocupação do solo focavam-se nos padrões de uso e ocupação do solo e numa análise das interações dos vários sistemas associados (sociológico, ecológico) e dos impactos que resultavam.

Mais recentemente estas alterações do uso e ocupação do solo passaram a ser entendidas como o resultado das interações de várias forças motrizes, e isso é patente em vários estudos sobre o uso e ocupação do solo em que são identificadas, estas forças podem ser naturais, políticas, institucionais, culturais, económicas, ecológicas, etc.

Através desta dissertação foi possível compreender como se desenrolam os acontecimentos de um episódio de cheia, e quais os fatores que a influenciam, não só os naturais, cuja sua importância já era identificada há bastante tempo, mas também a influência do ser humano, na forma como utiliza o território próximo de cursos de água. Podendo assim considerar que a artificialização dos solos e a sua ocupação indevida, aumenta os caudais de ponta cheia, que posteriormente podem conduzir a uma cheia.

As ocorrências de eventos revelam que o trabalho realizado ainda tem margem de progressão, adicionando o facto que no decorrer da conceção desta análise, ocorreram dois eventos de cheia nesta área, nos dias 7 e 13 de dezembro de 2022, que afetaram várias localidades e colocaram em causa a segurança das populações e provocando vários danos.

Revela-se necessária uma investigação mais aprofundada sobre este local, para descortinar a razão pela qual a ocorrência de cheias ser tão elevada. Sendo fundamental averiguar se existem possibilidades para que ocorra uma intervenção, de forma a prevenir e mitigar possíveis eventos futuros, e quando estes ocorrem para que não se verifiquem tantos danos, não prejudicando a população que tem contato com esta área no seu quotidiano.

Gostaria que no futuro este trabalho pudesse ter uma contribuição positiva para quem venha a desenvolver planos diretores municipais ou cartas de risco de cheias, pois penso que o estudo e caracterização do escoamento aqui realizados pode vir a ser uma ótima contribuição.

Ao replicar o método utilizado nas diferentes simulações, bem como o modelo hidrológico concebido, noutra área de maior dimensão como um fundo de um vale com um curso de água que tenha sofrido uma grande artificialização, num curto espaço de tempo. Também se conseguir-se-ia observar de forma mais representativa os impactos que o uso e a ocupação do solo possam influenciar nas condições de escoamento, que irão acentuar os caudais de ponta de cheia.

## **Bibliografia**

Almeida, C., & Romariz, C. (1989). Aspectos quantitativos da drenagem superficial do Algarve (Portugal). *Geolis*, II(January 1988), 110–114.

APA. (2022). Sistema Nacional de Informação do Ambiente - SNIAMB. [sniamb.apambiente.pt](http://sniamb.apambiente.pt)

Auch, R. F., Napton, D. E., Kambly, S., Moreland, T. R., & Saylor, K. L. (2012). The driving forces of land change in the Northern Piedmont of the United States. *Geographical Review*, 102(1), 53–75. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2012.00130.x>

BEDIENT, P. B., HUBER, W. C., & VIEUXP, B. E. (2008). Hydrology and Floodplain Analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(3), 332–334. <https://doi.org/10.1002/ep.11677>

Brandão, C., Rodrigues, R., & Costa, J. (2001). Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental. Instituto Nacional da Água (INAG).

Brierley, G. (2008). Geomorphology and river management. *Kemanusiaan*, 15(September 2006), 13–26. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2006\)26\[884:garm\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2006)26[884:garm]2.0.co;2)

Chen, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Luan, Q., & Chen, X. (2020). Flash floods, land-use change, and risk dynamics in mountainous tourist areas: A case study of the Yesanpo Scenic Area, Beijing, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50(12), 101873. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101873>

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. *Applied hydrology*. New York, Mc Graw-Hill, 1988. 572p.

Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J. L., & Blöschl, G. (2013). Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(8), 3295–3303. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>

Fleming, M., & Doan, J. (2013). HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension Version 10.1 (Issue February).

Fragoso, M., Trigo, R. M., Zêzere, J. L., & Valente, M. A. (2010). The exceptional rainfall event in Lisbon on 18 February 2008. *Weather*, 65(2), 31–35. <https://doi.org/10.1002/wea.513>

Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8866-2>

Kaatz, J. A. (2014). Development of a HEC-HMS Model to Inform River Gauge Placement for a Flood Early Warning System in Uganda. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/89851>

Leal, M. (2011). As Cheias Rápidas Em Bacias Hidrográficas Da AML Norte : Bacias Hidrográficas Da Aml Norte : [Tese de mestrado, Geografia - Geografia Física e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, 2011]. <http://hdl.handle.net/10451/5989>

Leal, M. (2019a). Cheias E Inundações Urbanas: Tipos, Características E Danos Materiais. *Água e Território - Um Tributo a Catarina Ramos*, 131–146. <http://hdl.handle.net/10451/41515>

Leal, M. (2019b). Inundações na Área Metropolitana de Lisboa : danos humanos e materiais e componentes do risco [Tese de doutoramento, Geografia (Geografia Física), Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, 2019]. <http://hdl.handle.net/10451/42267>

Lima, L., & Faísca, L. (1994). O ajustamento das populações ao risco de cheias: estudo exploratório em Portugal. In *Recursos Hídricos* (Vol. 15, Issue 2, pp. 3–19). <https://sapientia.ualg.pt/handle/10400.1/4892>

Lúcio, C. (2014). Análise do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio de Loures e modelação da sua susceptibilidade a cheias. [Tese de mestrado, Geografia - Geografia Física e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, 2014]. <http://hdl.handle.net/10451/20473>

Mazzoleni, M., Mård, J., Rusca, M., Odongo, V., Lindersson, S., & Di Baldassarre, G. (2021). Floodplains in the Anthropocene: A Global Analysis of the Interplay Between Human Population, Built Environment, and Flood Severity. *Water Resources Research*, 57(2). <https://doi.org/10.1029/2020WR027744>

Meneses, B. M., Reis, E., Pereira, S., Vale, M. J., & Reis, R. (2017). Understanding driving forces and implications associated with the land use and land cover changes in Portugal. *Sustainability (Switzerland)*, 9(3), 9–14. <https://doi.org/10.3390/su9030351>

Meneses, B. M., Reis, E., Reis, R., & Vale, M. J. (2018). The effects of land use and land cover geoinformation raster generalization in the analysis of LUCC in Portugal. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/ijgi7100390>

Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht, M. (2007). Flood risk mapping at the local scale: Concepts and challenges. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 25, 231–251. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3_13)

Neal, J., Villanueva, I., Wright, N., Willis, T., Fewtrell, T., & Bates, P. (2012). How much physical complexity is needed to model flood inundation? *Hydrological Processes*, 26(15), 2264–2282. <https://doi.org/10.1002/hyp.8339>

Parlamento Europeu e do Conselho. (2007). Diretiva n.º 2007/60/CE. *Jornal Oficial Da União Europeia*, 149(11), 533–534. <https://doi.org/10.1024/0036-7281.149.11.533>

Ramos, C. (2008). *DINÂMICA FLUVIAL E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO*.

Ramos, Catarina. (2008). *Dinâmica Fluvial e Ordenamento do Território*. SLIF- 6, Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa.

Ramos, Catarina, & Reis, E. (2001). As cheias no Sul de Portugal em diferentes tipos de bacias hidrográficas. *Finisterra*, 36(71), 61–82. <https://doi.org/10.18055/finis1648>

Santos, P. P., Tavares, A. O., & Andrade, A. I. A. S. S. (2011). Comparing historical-hydrogeomorphological reconstitution and hydrological-hydraulic modelling in the estimation of flood-prone areas—a case study in Central Portugal. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(6), 1669–1681. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1669-2011>

Santos, Pedro Pinto. (2009). *Cartografia de Áreas Inundáveis a Partir do Método de Reconstituição Hidrogeomorfológica e do Método Hidrológico-Hidráulico*. Estudo Comparativo na Bacia Hidrográfica do Rio Arunca. Dissertação de Mestrado em Geociências, área de Ambiente e Ordenamento do Território, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Sear, D. A., Newson, M. D., & Thorne, C. R. (2004). *Guidebook of Applied Fluvial Geomorphology*. Defra/Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme.

Smith, K., & Ward, R. C. (1999). Floods. *Physical Processes and Human Impacts*. In *Research Policy* (Vol. 28, Issue 4). [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(98\)00121-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(98)00121-8)

Trigo, R. M., Ramos, C., Pereira, S. S., Ramos, A. M., Zêzere, J. L., & Liberato, M. L. R. (2016). The deadliest storm of the 20th century striking Portugal: Flood impacts and atmospheric circulation. *Journal of Hydrology*, 541, 597–610. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.036>