

**MARIA CLARA SOUZA DOS SANTOS**

**IMPACTO ESTRUTURAL DE CHEIAS PLUVIAIS, CONSIDERANDO  
ABORDAGENS UNI E BIDIMENSIONAIS NA MODELAÇÃO DE  
ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS EM AMBIENTE URBANO**



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE  
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA**

**2022**



**MARIA CLARA SOUZA DOS SANTOS**

**IMPACTO ESTRUTURAL DE CHEIAS PLUVIAIS, CONSIDERANDO  
ABORDAGENS UNI E BIDIMENSIONAIS NA MODELAÇÃO DE  
ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS EM AMBIENTE URBANO**

**Mestrado em Engenharia Civil:**

**Estruturas**

**Trabalho efetuado sob a orientação de:**

**Professor Doutor Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro**

**Doutor Ricardo Daniel Oliveira Mendes Martins**



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA**

**2022**



IMPACTO ESTRUTURAL DE CHEIAS PLUVIAIS, CONSIDERANDO  
ABORDAGENS UNI E BIDIMENSIONAIS NA MODELAÇÃO DE  
ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS EM AMBIENTE URBANO

Declaração de Autoria do trabalho

Declaro ser a autora deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

---

Maria Clara Souza dos Santos

**Copyright – Maria Clara Souza dos Santos, UALG, ISE.**

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositório científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respectivos.

## AGRADECIMENTOS

Uma dissertação de mestrado é o resultado de uma longa trajetória e de muitas horas dedicadas a um propósito. Alguns momentos deste caminho foram percorridos sozinhos, porém, em outros momentos tive o prazer da companhia, ajuda e compreensão de pessoas que fizeram esta trajetória ser mais leve e que me forneceram forças para continuar. Este percurso e quem me acompanhou, mesmo que a distância, farão parte da minha história pessoal e acadêmica. Lembrarei de todos com muito carinho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Manuel Guieiro Pereira Isidoro, pelas excelentes aulas lecionadas, pela dedicação e comprometimento ao longo desses meses que trabalhamos juntos.

Ao meu coorientador Dr. Ricardo Daniel Oliveira Mendes Martins, pela simpatia, paciência e por todo conhecimento transmitido, que contribuíram muito para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família que mesmo a distância durante todo o mestrado, me apoiou e encorajou a continuar. Em especial à Ana Maria, Carmiliano, Humberto, Paula e Roberta Souza.

À Gianluca Cerioli pela enorme vontade de me ajudar e por todas as vezes que leu e contribuiu na revisão da escrita. Mas sobretudo, pela paciência, carinho e preocupação demonstrada.

Aos meus colegas da turma do mestrado e em especial aos amigos que se tornaram a minha família em Portugal: Brunna Carvalho, Rebecca Archanjo, Thayná Oliveira e Yan Andrade. Sem vocês esses anos longe do lar teriam sido muito mais desafiadores.

Aos meus amigos do Brasil que desde a minha despedida e até hoje, demonstraram sua amizade. Uma simples mensagem significava muito. Em especial: Luhan Alves, Roberta Viegas, Amanda Salles, Gustavo Lorenzo, Guilherme Pereira, Edson Silva e Samira Regina.

A todos o meu muito obrigada!



## RESUMO

A urbanização altera o uso do solo de uma bacia hidrográfica: as áreas permeáveis diminuem e as impermeáveis aumentam, fazendo com que menor quantidade de precipitação infiltre no solo. Ao associar o crescimento urbano com os eventos hidrológicos extremos e redes de drenagem projetadas para o cenário anterior ao da urbanização, pode-se ter como consequência as cheias urbanas.

Uma cheia provoca diversos danos diretos e indiretos, *e.g.*, na saúde da população, na economia e no patrimônio construído. O alvo desta dissertação é estudar o impacto de uma cheia urbana em construções existentes, infraestruturas, áreas agricultadas e nas zonas rurais. O fenômeno da cheia urbana ocorre principalmente devido à chuva intensa e ao sistema de drenagem que entra em carga. Neste cenário, o escoamento é impedido de entrar no sistema de drenagem e forçado a escoar na superfície, causando danos nas regiões atingidas. A água de uma inundação provoca várias ações que podem ter origem física, química ou biológica e que impactam um patrimônio construído de forma mais amena ou até mesmo a destruição total.

Para a realização do estudo deste impacto, utilizou-se a modelação hidrológica e hidráulica. Este tipo de modelação vem sendo utilizada nas últimas décadas para o dimensionamento da rede de drenagem, prevenir riscos e corrigir condicionantes urbanas estruturais que frequentemente resultam em cheias. Foram utilizadas duas aplicações computacionais para realizar a modelação, o SWMM (unidimensional) e o Iber (bidimensional). Admitiu-se como cenário um evento extremo, correspondente a um período de retorno de 100 anos. Com os resultados obtidos nas aplicações computacionais, realizou-se o estudo dos danos através do método das curvas profundidade-dano, que fornece os danos estruturais e não estruturais em valores monetários.

O estudo de caso incidiu sobre a vila de Cabanas de Tavira, ao sul de Portugal, devido a sofrer recorrentemente de cheias com origem em precipitações intensas de curta duração.

**Palavras-chave:** cheias urbanas; impacto estrutural; escoamento superficial; curvas profundidade-dano; modelação uni e bidimensional.



## **ABSTRACT**

Urbanization changes the land use of a catchment, as permeable areas decrease and impervious areas increase, causing less precipitation to infiltrate into the soil. By associating urban growth with extreme hydrological events and drainage networks designed for pre-urbanization scenarios, flooding can be a resulting hazard.

An urban flood can cause direct and indirect damages on different levels as it can compromise the health, the economy, and the heritage of a city. The overarching aim of this dissertation is to study the structural impact of the urban flood on buildings, infrastructures, and agricultural areas. The urban flood phenomenon usually happens because of short-duration high-intensity rainfall events over an ineffective stormwater drainage system. In this scenario, runoff is prevented from entering the drainage system and forced to flow back to the surface, causing damage to the affected areas. The flood water affects the existing buildings through physical, chemical, and biological factors, and can cause major damages and even the complete destruction of large areas.

The flood impact was analyzed by hydrological and hydrodynamic computational simulations, a somewhat common procedure to quantify and characterize flood prone areas thus mitigating flood risk. In this study two software packages were used: SWMM and Iber; both were set on an extreme 100-years flood scenario, considering a surcharged stormwater system, thus not contributing to drain the study case area. The tidal effect in the Ria Formosa coastal lagoon was also considered as a boundary condition. The results obtained from the computational simulation are used to make a preliminary evaluation of the flood impact using depth-damage curves, which provided the structural and non-structural damage in terms of economic losses. The case study is in Cabanas de Tavira, in the south of Portugal, prone to historical flood events.

**Keywords:** urban floods; structural impact; surface runoff; depth–damage curve; 1D and 2D models.



## ÍNDICE DE TEXTO

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE QUADROS .....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. Introdução .....	5
2.2. A drenagem na história .....	6
2.3. Drenagem de águas pluviais em meio urbano .....	10
2.4. Efeito da urbanização na rede de drenagem pluvial .....	12
2.5. Conceito tradicional e ambientalista de drenagem de águas pluviais.....	16
2.5.1. Conceito tradicional de drenagem de águas pluviais.....	17
2.5.2. Conceito ambientalista de drenagem de águas pluviais .....	18
2.6. Modelação hidrológica e hidráulica.....	22
2.6.1. Modelação hidrológica .....	23
2.6.2. Modelação hidráulica .....	28
2.6.3. Modelação da rede de coletores .....	30
2.6.4. Modelação do escoamento superficial.....	32
2.6.5. Modelos acoplados .....	35
2.7. Inundações e cheias .....	37
2.7.1. Inundações.....	39
2.7.2. Cheias .....	43
2.8. Desastres naturais .....	45
2.9. Consequências das alterações climáticas na drenagem pluvial .....	47
2.9.1. Aquecimento global .....	49
2.9.2. Precipitação intensa.....	50
2.10. Impacto Estrutural.....	51
2.10.1. Avaliação de impacto.....	61
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	65
3.1. Descrição do caso de estudo .....	65
3.2. Caracterização da bacia hidrográfica .....	67
3.2.1. Topografia e bacias .....	67
3.3. Definição da chuvada de projeto .....	69
3.3.1. Estimativa do tempo de concentração .....	69
3.3.2. Definição dos hietogramas .....	70
3.4. Caracterização do solo .....	72
3.4.1. Uso e ocupação.....	72
3.4.2. Tipos de solo .....	74
3.4.3. Estimativa do número de escoamento .....	75
4. MODELAÇÃO DE DRENAGEM SUPERFICIAL DO CASO DE ESTUDO. 77	
4.1. Aplicação computacional SWMM.....	79
4.1.1. Divisão e objetos .....	79

4.1.2. Processamento .....	83
4.2. Caracterização dos dados de entrada de Cabanas de Tavira - SWMM.....	85
4.2.1. Pluviômetro .....	85
4.2.2. Sub-bacia .....	86
4.2.3. Conduta.....	88
4.2.4. Nó de conexão .....	89
4.2.5. FOZ.....	89
4.2.6. Infiltração.....	90
4.2.7. Visualização dos resultados .....	92
4.3. Aplicação computacional Iber.....	93
4.3.1. Módulos e objetos.....	94
4.3.2. Processamento .....	95
4.4. Caracterização dos dados de entrada de Cabanas de Tavira - Iber .....	96
4.4.1. Geometria e definição da malha .....	96
4.4.2. Topografia .....	97
4.4.3. Rugosidade .....	98
4.4.4. Processo hidrológico.....	100
4.4.5. Infiltração.....	100
4.4.6. Condições de fronteira.....	101
4.4.7. Visualização dos resultados.....	102
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	103
5.1. Pontos analisados .....	103
5.2. Danos.....	111
5.3. Discussão.....	113
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	119
ANEXOS.....	127
ANEXO A – Danos devido às profundidades obtidas com a modelação no SWMM. .....	129
ANEXO B – Danos devido às profundidades obtidas com a modelação no Iber.....	130

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – (A) Imagem de Harappan acima do esgoto, canal construído de tijolo queimado, (B) Imagem de Mohenio-Daro canal de esgoto escavado (Burian & Edwards, 2002). .....	7
Figura 2.2 - Cisterna em Fermo, Itália (Burian & Edwards, 2002). .....	7
Figura 2.3 - Fotografia do quadro representativo da Secção de Melhoramentos de Águas e Saneamento no Distrito de Faro durante os anos de 1933 a 1940 (Pato, 2011).....	8
Figura 2.4 – Impacto da urbanização no ciclo da água, considerando a superfície natural. ....	14
Figura 2.5 – Impacto da urbanização no ciclo da água, considerando 75% a 100% da superfície impermeável. ....	14
Figura 2.6 - Comparação conceitual entre hidrograma natural e após uma urbanização. O caudal de ponta de uma região que sofreu a urbanização ocorre num tempo muito mais curto do que em um cenário natural. É visível também o maior volume escoado na situação urbanizada quando comparada com a natural. ....	15
Figura 2.7 – Alguns elementos utilizados em um sistema de drenagem urbana (Aqualuz,2013). ....	18
Figura 2.8 - Exemplos de técnicas SUDS frequentemente usadas para diferentes tipos de desenvolvimento urbano (Woods-Ballard <i>et al.</i> , 2015). ....	20
Figura 2.9 - Comparação conceitual entre os hidrogramas de pré desenvolvimento (azul), após desenvolvimento utilizando o sistema LID (verde) e utilizando o sistema higienista (vermelha) (Canholi, 2014). ....	21
Figura 2.11 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com o processo de descrição. Adaptado de (Abdulkareem <i>et al.</i> , 2018).....	24
Figura 2.11 - Representação do método 1D, com a análise do escoamento pluvial na rede de conduta secundária. ....	30
Figura 2.12 - Fluxo unidimensional ( $F1Dn$ ), variando em um troço $\Delta x$ (Bladé <i>et al.</i> , 2012). ....	32
Figura 2.13 - Representação de um escoamento superficial na rede de drenagem primária, sem a contribuição do sistema secundário, e podendo a modelação ser realizada pelo método 1D ou 2D. ....	33
Figura 2.14 – Representação de um modelo acoplado, com fluxo no sistema primário e secundário. Podendo o método de acoplamentos ser analisado em 1D-1D ou 1D-2D.....	35
Figura 2.15 – Representação do leito normal e de inundação num canal, em ambiente natural. Caso atinja o nível de leito de inundação somente a vegetação será atingida.....	38
Figura 2.16 – Representação do leito normal e de inundação num canal, numa área urbanizada. Nesta situação, quando a água ultrapassa o leito normal atinge as atividades humanas que estão ocupando as margens.....	39
Figura 2.17 - Cheia ocorrida no rio Pó, Cremona, Itália. (Cremonaoggi, 2019). ....	40
Figura 2.18 - Afloramento da toalha freática provocando lagoas artificiais (Epal, 2018). ....	40
Figura 2.19 - Inundação costeira na praia do Furadouro, Ovar, Portugal (APA, 2020). ....	41
Figura 2.20 - Inundação urbana no Morumbi, São Paulo, Brasil (Globo, 2020a).....	42

Figura 2.21 – Previsão de mudanças induzidas por diferentes de níveis de aumento de temperatura global: +4°C, +2°C e +1.5°C, segundo IPCC 2021 Adaptado (USP, 2022).....	48
Figura 2.22 – Imagem A - destruição parcial de uma casa devido ao enfraquecimento da fundação numa inundação, Bohemia 1897 (Drdacky, 2010). Imagem B – Casa parcialmente destruída por um veículo que foi arrastado pelas águas de inundação, Petrópolis 2022 (CNN, 2022).....	51
Figura 2.23 – Ação do impacto da inundação numa construção. Uma onda de inundação com altura H e velocidade v impacta a construção ao atingir a superfície da alvenaria. A pressão de impacto diminui linearmente com a distância da parte inferior do edifício. A distribuição da pressão de impacto na superfície do edifício deve ser afetada pela porta, pela janela e pelas condições de contorno (Xiao <i>et al.</i> , 2021).....	53
Figura 2.24 - Parede de uma residência destruída após inundação, Alemanha 2021 (Euronews, 2021). .....	53
Figura 2.25 - Telhado de um pavilhão que flutuou para uma distância longa da sua origem devido à inundação (Drdacky, 2010). .....	54
Figura 2.26 – Objetos desequilibrados e empilhados após uma inundação, Minas Gerais, 2020 (Globo, 2020b) .....	54
Figura 2.27 – Ponte rodoviária e margens de um rio danificadas após inundação, Alemanha 2021 (Carrington, 2021). .....	55
Figura 2.28 – Estrutura de ponte romana afetada por inundação, Tavira 1989 (RTP, 1989).....	55
Figura 2.29 – Deslizamento de terra devido a uma inundação, Erfstadt-Blessem 2021 (BBC, 2021). .....	56
Figura 2.30 - Vigas do piso de madeira deteriorada de uma casa que ficou totalmente imersa na água durante a inundação, Praga 2002 (Drdacky 2010). .....	57
Figura 2.31 - Dano devido a ação química após edifício ser inundado, Keighley 2000 (Kelman & Spence, 2004). .....	58
Figura 2.32 - Via interrompida devido acúmulo de objetos arrastados pela inundação, Schuld 2021 (Metsul, 2021). .....	58
Figura 2.33 – Residência inundada e com blocos de gelos em seu entorno, Michigan 2008 (Press, 2008). .....	59
Figura 2.34 - Sistema de drenagem rompido e passeio danificado após uma inundação, Algarve 2020 (Lusa, 2020).....	59
Figura 2.35 - A inundação em um rio com período de retorno a cada dez anos (TR10), afetando os Edifícios 2 e 3 (azul escuro). Devido à exposição dos edifícios, a profundidade de inundação varia para cada edifício (estágio), portanto, esperamos uma taxa de perda maior para o Edifício 3 do que para o Edifício 2. Para uma inundação com período de retorno de 100 anos (TR100), as perdas acumuladas são maiores à medida que mais objetos (neste exemplo) todos os quatro edifícios são afetados (azul claro) (Elmer <i>et al.</i> , 2010). .....	61
Figura 3.1 – Localização de Cabanas de Tavira no sistema de coordenadas EPSG:3763-TRS89.....	65
Figura 3.2 – Fotografia aérea de Cabanas de Tavira em 1991 (A) e em 2021 (B). (Imagem A - Isidoro, 2012); (imagem B - Google Maps, 2021). .....	66

Figura 3.3 – Ribeira da Canada (1) e Ribeira do Pocinho (2) e suas linhas d'águas (linha azul). Os deságues de ambas estão nomeadas como A, B. A região representada por linhas inclinadas laranja tem seu deságue direto na Ria formosa, através de dispositivos de drenagem. A linha vermelha representa a divisão entre as sub-bacias. ....	67
Figura 3.4 - Fotografia do deságue da Ribeira da Canada.....	68
Figura 3.5 – Fotografia do deságue da Ribeira do Pocinho.....	68
Figura 3.6 - Topografia das bacias de estudo com curvas de nível de equidistância 5m. ....	69
Figura 3.7 - Uso e ocupação do solo na bacia .....	72
Figura 3.8- Tipos de solo das duas bacias a partir da classificação SCS.....	74
Figura 3.9 - Números de escoamento (AMC II) na bacia.....	75
Figura 3.10 - Números de escoamento (AMC III) nas duas bacias.....	76
Figura 4.1 – Demonstração de alguns objetos disponíveis para modelação no SWMM. Nesta dissertação serão utilizados somente os objetos referentes ao escoamento superficial (EPA, 2015). ....	81
Figura 4.2 - Conceito de sub-bacia no SWMM (EPA, 2015).....	82
Figura 4.3 - Esquematização simplificada do processo de precipitação-escoamento. ...	82
Figura 4.4 - Diagrama do processamento SWMM (EPA, 2016).....	83
Figura 4.5 - Processo de transição de estado do SWMM (EPA,2016).....	84
Figura 4.6 - Representação das 21 sub-bacias. ....	86
Figura 4.7 - Representação das ruas como uma secção retangular no SWMM, onde as possíveis barreiras laterais das ruas são as paredes da secção retangular.....	88
Figura 4.8 – Foto do local e a representação no SWMM da Ribeira da Canada e rua adjacente. ....	88
Figura 4.9 - Representação da cota que se inseriu no nó.....	89
Figura 4.10 - Números de escoamento (CN- AMC III) das sub-bacias do SWMM. ....	91
Figura 4.11 - Representação das profundidades de água obtidas após 1 hora de precipitação. Não necessariamente representam as maiores profundidades obtidas. ....	92
Figura 4.12 - Estrutura de processamento da aplicação computacional Iber.....	95
Figura 4.13 – Determinação da geometria e superfícies na aplicação Iber. ....	96
Figura 4.14 - Malha gerada no Iber através de triângulos, a partir das superfícies criadas anteriormente. ....	97
Figura 4.15 - Demonstração do formato .TIF retirado do QGIS e posteriormente atribuído à malha no Iber. ....	98
Figura 4.16 – Atribuição do uso do solo a partir da carta CORINE no Iber. ....	99
Figura 4.17 - Malha com os coeficientes de escoamento do método Curva-número... 101	
Figura 4.18 - Representação da profundidade de água na superfície no tempo de 1 hora. ....	102
Figura 5.1 - Indicação dos pontos utilizados para realizar a comparação da profundidade de água nas duas aplicações.....	104
Figura 5.2 - Representação das áreas retiradas na sub-bacia I, para o cálculo do dano. ....	112



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Tempo de retorno de micro e macrodrenagem, conforme tipo de ocupação. Tucci (1993), citado por Silva (2017).....	12
Quadro 2.2 - Fatores que influenciam o escoamento superficial. Padrão (2016), citando Chow (1988). .....	13
Quadro 2.3 - Principais efeitos da urbanização na rede de drenagem urbana. ....	15
Quadro 2.4 - Estágios do desenvolvimento da drenagem urbana nos países desenvolvidos (Forgiarini <i>et al.</i> , 2007). SNSA (Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental-Brasil). *Período em que iniciou este tipo de visão. ....	16
Quadro 2.5 – Resumo das características dos modelos: empírico, conceitual e baseado em física. Adaptado (Devi <i>et al.</i> , 2015). .....	26
Quadro 2.6 - Tipos de modelos, características e usos da modelação hidrológica (Almeida & Serra, 2017). .....	27
Quadro 2.7 - Potenciais de abordagens de modelação para representar o processo de fluxo dominante e a provável saída. Adaptado (Bulti & Abebe, 2020). DTM ( <i>Digital Terrain Model</i> )-modelo digital do terreno. ....	29
Quadro 2.8 - Precisão relativa, requisitos de tempo de execução e escala adequada de aplicações de abordagens de modelação de inundação. Adaptado (Bulti & Abebe, 2020). .....	29
Quadro 2.9 – Fatores, naturais ou de ação humana, agravantes das cheias (Ramos, 2013). .....	45
Quadro 2.10 - Desastres naturais ocorridos em Portugal, entre os anos 1970 a 2020, valores em percentagem. Dados acessados em novembro de 2021, na base de dados da EM-DAT.....	46
Quadro 2.11 - Aumento da temperatura global entre 1850 e 2020. Temperaturas observadas (linha preta) e simuladas (castanho e azul) (IPCC, 2021).....	49
Quadro 2.12 – Aumento da chuva com frequência de 10 anos, em relação ao aumento da temperatura global. Comparação ao momento atual, e outros possíveis três cenários de aumento da temperatura: 1.5° C, 2° C, 4° C. (IPCC, 2021). ....	50
Quadro 2.13 - Ações e características da água de uma inundação em um patrimônio construído.....	52
Quadro 2.14 - Categorias de danos causados por inundações ( Machado <i>et al.</i> , 2005). 62	
Quadro 2.15 – Danos em Euros/m <sup>2</sup> , considerando o tipo de patrimônio (Huizinga <i>et al.</i> , 2017). .....	63
Quadro 2.16 - Fator de dano-profundidade da água de inundação, conforme o tipo de patrimônio construído (Huizinga <i>et al.</i> , 2017).....	64
Quadro 2.17 - Curva Profundidade-dano de acordo com o patrimônio construído (Huizinga <i>et al.</i> , 2017). .....	64
Quadro 3.1 - Cálculo hietograma para TR 100 anos .....	71
Quadro 3.2 - Identificação código CORINE e ocupação na bacia. ....	72
Quadro 3.3 – Associação de valores de Número de Manning com classificação CORINE (Papaioannou <i>et al.</i> , 2018). .....	73
Quadro 4.1 – Fluxograma com o processo percorrido através da modelação para se obter os danos nos patrimônios construídos. ....	77
Quadro 4.2 – Resumo do formato e dos dados inseridos conforme a aplicação. ....	78
Quadro 4.3 – Categoria de estudos e suas características no SWMM (EPA, 2015). ....	80

Quadro 4.4 - Gráfico gerado pelo SWMM após a inserção dos dados pluviométricos com tempo de retorno de 100 anos.....	85
Quadro 4.5 – Características das sub-bacias inseridas no SWMM.....	87
Quadro 4.6 - Os módulos utilizados no Iber e suas características. ....	94
Quadro 4.7 - Valores de Número de Manning utilizados na bacia de estudo. ....	99
Quadro 4.8 - Gráfico gerado pelo Iber após a inserção dos dados pluviométricos com período de retorno de 100 anos. ....	100
Quadro 5.1 – Profundidade máxima de água obtida nos pontos analisados. ....	104
Quadro 5.2 - Evolução da profundidade de água do ponto A, no SWMM.....	105
Quadro 5.3 - Evolução da profundidade de água do ponto A, no Iber.....	105
Quadro 5.4 - Evolução da profundidade de água do ponto B, no SWMM. ....	106
Quadro 5.5 - Evolução da profundidade de água do ponto B, no Iber.....	106
Quadro 5.6 - Evolução da profundidade de água do nó 6, no SWMM.....	107
Quadro 5.7 - Evolução da profundidade de água do nó 6, no Iber.....	107
Quadro 5.8 - Evolução da profundidade de água no ponto D, no SWMM.....	108
Quadro 5.9 - Evolução da profundidade de água do ponto D, no Iber.....	108
Quadro 5.10 - Evolução da profundidade de água do ponto E, no SWMM. ....	109
Quadro 5.11 - Evolução da profundidade de água do ponto E, no Iber.....	109
Quadro 5.12 - Evolução da profundidade de água do ponto F, no SWMM.....	110
Quadro 5.13 – Evolução da profundidade do nível de água do ponto F, no Iber.....	110
Quadro 5.14 - Dados utilizados para o cálculo dos danos na sub-bacia I. ....	112
Quadro 5.15 - Resumo dos danos devido as profundidades de água obtidas nas duas aplicações. ....	112

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento geral

Nas últimas décadas houve um movimento migratório populacional para as regiões urbanas, que não estavam preparadas para receber essa nova população. Diante disso, houve a necessidade da realização de novas construções para garantir a vivência dessa população. Nas zonas costeiras o movimento migratório também acontece, e se soma à procura turística, gerando a especulação imobiliária que tende a provocar o aumento das construções com grande proximidade à linha de costa, pois quanto mais próximo ao mar mais valorizado será o imóvel. O aumento da urbanização destas regiões tende a gerar problemas nas infraestruturas existentes, por exemplo na mobilidade, nos serviços públicos e no saneamento básico.

Um dos problemas nas infraestruturas que surge nas regiões afetadas pela urbanização, e que é o objeto desta dissertação, é a drenagem de águas pluviais. Um dos principais fatores que afeta a drenagem urbana é a impermeabilização da superfície, pois uma parcela da água precipitada que anteriormente poderia infiltrar no solo natural por este ser permeável, agora escoar superficialmente, gerando o aumento do volume de água na superfície. Portanto, para ter capacidade de lidar com este aumento de volume é necessário um sistema de drenagem que tenha sido planeado para tal, e que receba manutenção adequada ao longo do tempo.

A combinação da urbanização mal planeada com uma infraestrutura de drenagem incapaz de gerenciar esse aumento do volume de água no sistema, quando associado a eventos extremos de precipitação, cria um cenário muito susceptível de potenciar a ocorrência de cheias urbanas.

As cheias urbanas podem causar grandes impactos no patrimônio construído e na vida da população. Ao falarmos na população, podemos ver a economia e a saúde sendo afetados. Ao focarmos no impacto do patrimônio construído, temos deslizamentos de terra, destruição parcial ou total de um edifício, arrastamento de objetos, interdição de vias pública, entre outros.

## **1.2. Objetivos**

Esta dissertação tem como base a modelação hidrológica e hidráulica do escoamento superficial em meio urbano associado a eventos extremos de precipitação, com vista à análise do impacto estrutural e não estrutural de cheias com origem pluvial em Cabanas de Tavira, Concelho de Tavira, Distrito de Faro.

Pretende-se efetuar a comparação entre os resultados obtidos através da modelação hidrodinâmica uni e bidimensional, discutindo acerca da aplicabilidade e eficácia relativa de cada um dos modelos. A comparação será realizada através de duas aplicações computacionais, nomeadamente SWMM e Iber, que possuem distribuição livre e gratuita. Neste estudo considerou-se um período de retorno elevado (100 anos), admitindo que o sistema de micro drenagem da região, isto é a rede de coletores, atingiu a sua capacidade máxima, deixando de responder à função para a qual foi desenhado, e, portanto, no cenário estudado o escoamento dá-se apenas ao nível da superfície.

Pretende-se, principalmente, efetuar a análise do impacto económico decorrente de um evento extremo, nomeadamente ao nível do património construído (*e.g.*, os edifícios residenciais, não residenciais, infraestruturas rodoviárias) e áreas rurais (*e.g.*, as áreas agricultadas) e respetiva aferição de dano estrutural e não estrutural.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação é composta por seis capítulos, estando organizada da seguinte forma:

No capítulo 1 tem-se a apresentação inicial ao tema que se propõe estudar, definem-se os objetivos, e descreve-se sumariamente a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 tem-se a revisão bibliográfica para dar base ao estudo que será apresentado. Esta revisão concentra-se nas seguintes temáticas: o sistema de drenagem de águas pluviais, a modelação hidrológica e hidráulica, as inundações urbanas, e as consequências das alterações climáticas na drenagem urbana e os danos estruturais causados pelas inundações.

No capítulo 3 apresenta-se o caso de estudo de Cabanas de Tavira, pertencente ao Distrito de Faro, na região sul de Portugal, onde será realizada a modelação hidrológica e onde, entre outros aspetos, se caracterizam as bacias hidrográficas, nomeadamente no que respeita ao uso e tipo de solo.

No capítulo 4 realiza-se a modelação de drenagem superficial através das aplicações computacionais SWMM e Iber, que permitem fazer uma análise uni e bidimensional,

respectivamente, da hidrodinâmica na área em estudo. Neste capítulo apresenta-se uma descrição dessas aplicações computacionais, a forma de utilização, o modelo numérico, os dados de entrada utilizados para a modelação, e finaliza-se com a apresentação dos resultados obtidos em cada aplicação.

No capítulo 5 são comparados e discutidos os resultados de ambos os modelos computacionais utilizados, nomeadamente entre a melhor ou pior adequação da modelação uni ou bidimensional para o caso de estudo, e efetuando-se a análise do impacto estrutural e não estrutural da cheia de origem pluvial simulada.

No capítulo 6, salientam-se as principais conclusões obtidas durante o estudo que permitiu realizar esta dissertação, tecendo-se também propostas para possíveis desenvolvimentos futuros no seguimento deste trabalho.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Introdução**

Como mencionado por Lonetti & Maletta, (2018) o impacto das ações de inundação em patrimônios construídos deve ser um tema multidisciplinar entre o estudo da estrutura e da mecânica dos fluidos. Nesta revisão bibliográfica procurou-se percorrer este caminho.

Ao longo deste capítulo serão apresentados os princípios e conceitos utilizados para a realização da dissertação.

Após a introdução, tem-se a Seção 2.2 abordando a evolução da drenagem ao longo da história, começando com as primeiras civilizações e chegando ao atual cenário da drenagem pluvial em Portugal. Na seção 2.3 apresenta-se a drenagem de águas pluviais em meio urbano, através de alguns conceitos utilizados na área. A seção 2.4 é responsável em apresentar os efeitos que o aumento da urbanização mal planeada pode causar ao sistema de drenagem urbana e como é necessária a criação de meios mais sustentáveis de drenagem pluvial. Na seção 2.5 tem se a apresentação e diferenciação dos conceitos tradicionais e higienista de drenagem pluvial. A seção 2.6 aborda a modelação hidrológica e hidráulica, com as suas variantes. Na seção 2.7 apresenta-se os conceitos de inundações e cheias. A seção 2.8 mostra alguns desastres relacionados com as inundações. A seção 2.9 apresenta como as alterações climáticas afetam a drenagem pluvial. E para finalizar tem-se a seção 2.10 que é responsável em abordar o impacto estrutural que as águas de inundações causam no patrimônio construído.

## **2.2. A drenagem na história**

No surgimento das civilizações, isto é, quando os seres humanos começaram a viver em sociedade organizada, o termo “drenagem” era utilizado para nomear os sistemas de irrigação agrícola. Posteriormente, o termo foi utilizado também para nomear o sistema que melhoraria o local de vivência da civilização, como a regularização da humidade do solo e o desvio de águas para a realização de construções. Ao longo do tempo a drenagem foi sendo aperfeiçoada conforme o aumento populacional, os materiais disponíveis, e as necessidades de cada época.

De acordo com Burian & Edwards, (2002), um dos grandes exemplos de sistema de drenagem da história, foi realizado pela civilização Hindu. O início desta civilização é registrado por volta de 3.000 anos A.C. e tendo como localização aproximada a região hoje compreendida entre a Índia e o Paquistão. As cidades de então, eram conhecidas por sua qualidade na organização, planeamento urbano, abastecimento e especificamente na drenagem das águas, que mostraram uma tecnologia avançada para a época. Os relatos históricos sugerem que os sistemas de drenagem foram construídos com muito cuidado e que os objetivos eram de captar a água da chuva, evitar inundações e transportar resíduos.

As ruínas de duas cidades em particular, Harappan e Mohenio-Daro, forneceram uma amostra detalhada do sistema de drenagem urbana utilizada pelo povo Hindu. Separadas por cerca de 570 km, essas cidades sugerem que foram posicionadas estrategicamente e que o sistema de drenagem foi realizado conforme a disposição das cidades. Os canais, por exemplo, eram escavados no solo ou construídos com tijolo queimado acima do nível do pavimento (Burian & Edwards, 2002). Nas Figura 2.1, é possível ver exemplos do sistema de drenagem dessa civilização.

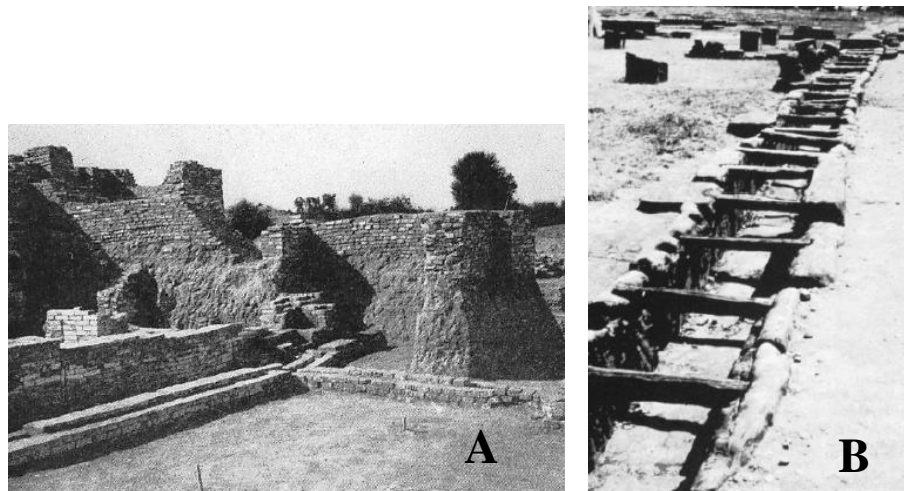


Figura 2.1 – (A) Imagem de Harappan acima do esgoto, canal construído de tijolo queimado, (B) Imagem de Mohenjo-Daro canal de esgoto escavado (Burian & Edwards, 2002).

Mais à frente na história, durante o período de permanência etrusca na Itália (800-350 A.C), estradas e sistemas de drenagem foram construídos, mas não eram tão cuidadosamente pensadas como a infraestrutura romana. Durante o império romano (27 A.C. a 395 D.C.), aconteceu a reconstrução e ampliação de muitos dos esgotos e ruas dos etruscos. Nesse período novas tecnologias foram desenvolvidas e as estradas foram pensadas também para a captação das águas superficiais, principalmente em áreas com baixa altitude. Ao longo de algumas estradas, foi implementado meio-fio e sumidouros para realizar o escoamento superficial direto para canais de drenagem abertos (Burian & Edwards, 2002). As águas captadas eram armazenadas em cisternas e utilizadas pelos locais, na Figura 2.2 é possível ver exemplo de uma cisterna do período Romano.

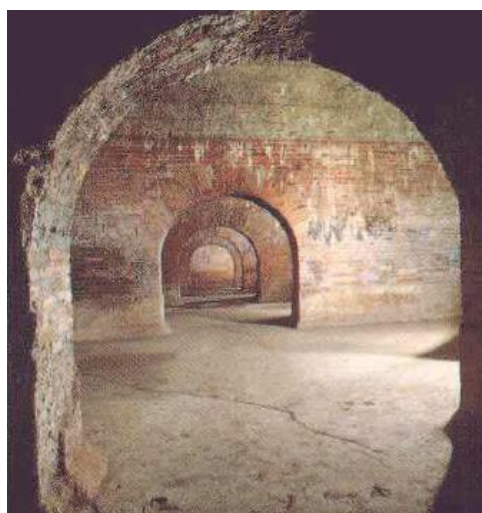


Figura 2.2 - Cisterna em Fermo, Itália (Burian & Edwards, 2002).

De acordo com Pato (2011), em Portugal os contornos essenciais da saúde começaram a se definir no final do século XIX, devido ao reconhecimento científico da relação entre as doenças infecciosas, as altas taxas de mortalidade e a falta de sistema de saneamento e abastecimento da população. Assim, esta relação serviu como argumento para iniciar uma reforma nos sistemas da saúde pública em todo o país. A melhoria destes sistemas deveria levar em consideração os conceitos técnicos utilizadas em algumas cidades europeias e americanas, mas para obter o resultado esperado era necessário a criação de algumas medidas e desenvolvimento em outras áreas, como a formação de técnicos, expansão da rede de laboratórios de saúde pública e monitorização da situação sanitária do país. Uma das medidas adotadas foi a criação da Seção de Melhoramento Sanitários, que buscava entre outros motivos, a resolução de problemas, formação de técnicos para engenharia e medicina sanitária, fiscalização e de determinação das obras a serem realizadas. Em 1903, realizou-se o primeiro inquérito sobre as condições sanitárias das “principais povoações portuguesas”, abrangendo menos de 25% da população.

Na Figura 2.3 tem-se a ilustração dos planos de melhorias para a região do Algarve.



Figura 2.3 - Fotografia do quadro representativo da Secção de Melhoramentos de Águas e Saneamento no Distrito de Faro durante os anos de 1933 a 1940 (Pato, 2011).

Porém, entre a criação das melhorias e a sua concretização existiam alguns fatores que dificultavam o processo, como a indecisão do modelo de organização política-administrativa e a situação financeira do país que não conseguia cumprir os compromissos financeiros internacionais e declarou falência em 1892. Uma das medidas que visava a formação de técnicos, era o curso de formação avançada em saúde pública

que inicialmente tinha o objetivo de integrar medicina e engenharia sanitária, porém a falta de alunos limitou o curso apenas a medicina. Assim, a falta de técnicos e recursos financeiros eram as justificativas para a falta de operação da administração sanitária e das autarquias. As décadas seguintes não tiveram mudanças significativas. Portugal chega no início da década de 1970 numa situação de atraso sanitário, com elevadas taxas de mortalidade e morbidade por doenças infecciosas relacionadas à falta de condições de higiene e a lentidão do processo de infraestruturação (Pato, 2011).

Ambrósio (1998), analisa as mudanças do saneamento básico de Portugal através de quatro períodos:

- O primeiro período terminou em 25 de Abril de 1974, com a queda do regime político que se havia instaurado em 1926. Neste período manteve-se a política iniciada em 19 de setembro de 1932, com o Decreto nº 21.698. As medidas para a infraestrutura sanitária que o governo tomou alcançaram níveis de atendimento muito abaixo do esperado e comparado aos níveis de qualidade e desenvolvimento de outros países da Europa, o governo mandou realizar diversos estudos nos quais se previam a divisão do país em Regiões de Saneamento Básico (entre seis e dez) dotadas de empresas públicas para a gestão e exploração, incluindo a construção, dos sistemas de abastecimento de água, de águas residuais e de resíduos sólidos dos aglomerados populacionais. Chegou a ser consagrada a lei da criação das regiões de saneamento básico e constituídas as Comissões Instaladoras do que deveriam vir a ser as correspondentes empresas públicas.
- O segundo período iniciou no fim da ditadura e permaneceu até 1986, ano da adesão de Portugal à então CEE (Comunidade Económica Europeia). Neste período foram realizados investimentos significativos na execução de novas infraestruturas, com a participação financeira do Estado e, também, e pela primeira vez, em alguns casos, com financiamentos negociados com o Banco Mundial e com o KFW - *Kreditanstalt für Wiederaufbau* da Alemanha, mantendo-se as atribuições de gestão e exploração dos sistemas nos municípios. Em 1977, com a Lei nº 46/77, passou a estar vedado ao setor privado o acesso a certas atividades económicas, como as de abastecimento de água, de drenagem e tratamento de águas residuais urbanas.
- O terceiro período decorreu até 1993, em que se consagrou na lei a possibilidade de intervenção do setor privado em atividades económicas pertinentes ao abastecimento de água e à drenagem e tratamento das águas residuais urbanas. Este período iniciou-se com a entrada de Portugal na CEE, quando os governos assumiram o compromisso

de atingir os indicadores qualitativos e quantitativos no abastecimento de água, na drenagem e tratamento de águas residuais urbanas, apropriados à condição de Estado-membro.

- O quarto período iniciou em 1993 com a publicação do Decreto-Lei nº 372/93, de 29 de outubro, que, alterando a Lei nº 46/77 atrás referida, passou a permitir o acesso do setor privado, em certas condições, ao abastecimento de água, a drenagem e tratamento de águas residuais urbanas; entrou-se no quarto período que prossegue hoje em dia.

Desde o início do quarto período, foram realizados em Portugal mais de oito mil milhões de euros de investimentos em sistemas de abastecimento de água, saneamento de águas residuais e gestão de resíduos urbanos (Alegre & Covas, 2010).

No início dos anos dois mil, teve-se o Plano Estratégico de Abastecimento de Águas e Saneamento de Águas Residuais para o período 2000-2006, PEAASAR, que “veio reforçar as linhas de orientação anteriormente definidas, nomeadamente a promoção de soluções integradas, a redução de perdas de água e a reutilização de águas residuais tratadas”. Para os anos de 2007-2013, teve-se o PEAASAR II, que indicava “medidas de otimização de gestão nas vertentes em alta e em baixa e de otimização do desempenho ambiental do setor” (Ramos, 2017). No período compreendido entre 2014-2020, tem-se o PENSAAR 2020 que propõe um conjunto importante de indicadores para cada um dos objetivos operacionais que servirão, na sua grande maioria, para avaliar o progresso do Plano e para os quais se definiram valores de base atuais e metas que se pretendia atingir em 2020 (ERSAR, 2017). E para o período atual temos o PENSAARP 2030 (2021-2030), que deve constituir como o instrumento norteador das políticas para o ciclo urbano da água e da sua articulação com as restantes políticas setoriais relevantes e responder aos desafios que se colocam, por exemplo, por força das alterações climáticas (Diário da República, 2020).

### **2.3. Drenagem de águas pluviais em meio urbano**

De acordo com Marques *et al.*, (2013), dimensionar um sistema de drenagem de águas pluviais urbanas num dado aglomerado urbano é mais do que conceber uma rede de coletores, canais e acessórios para drenar os caudais provocados por precipitações. De uma forma global, as águas decorrentes da chuva e captadas nas vias públicas por meio

sarjetas e sumidouros, bem como de outras áreas urbanas (*e.g.*, parques e zonas recreativas), são lançadas em cursos de águas naturais, no oceano, em lagos ou, no caso de solos permeáveis, sobre o terreno para se infiltrarem no subsolo. Os sistemas pluviais urbanos podem funcionar como sistemas preventivos de inundações, principalmente nas áreas mais baixas das zonas urbanas, por serem mais vulneráveis ao acúmulo de água. Quando um sistema de drenagem de águas pluviais é bem projetado e tem manutenção adequada, reduz-se significativamente o risco de inundação, evitando-se, *e.g.*, prejuízos e interferências com o tráfego de pedestres e veículos. Em termos mais específicos, um adequado sistema de drenagem proporciona uma série de benefícios, como:

- a) Redução de áreas inundadas;
- b) Proteção do tráfego rodoviário e pedestre;
- c) Redução de gastos com manutenção das vias públicas e áreas adjacentes permeáveis e impermeáveis;
- d) Eliminação da presença de águas estagnadas;
- e) Redução da erosão hídrica do solo;
- f) Permite eventualmente o reaproveitamento da água pluvial;
- g) Impede a proliferação de doenças.

O sistema de drenagem é composto por vários processos, incluindo coleta, transporte, armazenamento, tratamento de águas residuais e/ou pluviais, bem como a disposição final da água tratada. O sistema de drenagem urbana envolve a maioria destes processos dentro das cidades e das áreas urbanas (García *et al.*, 2015). Para Silva (2017), o sistema drenagem é dividido em dois grupos de estruturas: microdrenagem e macrodrenagem. Onde o sistema de microdrenagem se dá pela rede de captação e condução a do caudal, no qual as águas são captadas e levadas para o corpo d'água mais próximo ou são conduzidos para o sistema de macrodrenagem. Tendo esses termos, as seguintes definições:

- Microdrenagem: É composta pelo sistema menor, como sarjetas, condutas, sumidouros, caixas de inspeção, bocas de lobo, ruas e canais de pequenas dimensões, ou seja, os primeiros elementos a receberem a contribuição da água precipitada nas construções, lotes e ruas. Para seu estudo/dimensionamento o período de retorno varia entre 2 a 10 anos, conforme o tipo de ocupação urbana.
- Macrodrenagem: É composta pelo sistema maior da rede de drenagem, podendo ser a rede natural pré-existente na bacia (como os rios, talwegues e córregos) ou

por obras artificiais (como galerias de grandes dimensões e barragens). A macrodrenagem pode ter como função receber a contribuição da microdrenagem e também fazer o escoamento (direto) da água superficial. Para seu estudo/dimensionamento o período de retorno varia entre 50 a 500 anos, conforme o tipo da ocupação urbana.

No Quadro 2.1 apresenta-se os períodos de retorno indicados conforme o tipo de ocupação.

Quadro 2.1 - Tempo de retorno de micro e macrodrenagem, conforme tipo de ocupação. Tucci (1993), citado por Silva (2017).

Tipos de obra	Tipos de ocupação da área	T (anos)
<b>Microdrenagem</b>	Residencial	2
	Comercial	5
	Áreas com edifícios de serviços ao público	5
	Aeroportos	2 - 5
	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5 - 10
<b>Macrodrenagem</b>	Áreas comerciais e residenciais	50-100
	Áreas de importância específica	500

#### 2.4. Efeito da urbanização na rede de drenagem pluvial

Durante grande parte da história da humanidade, a urbanização concentrou-se em dois objetivos principais: defesa e extração de recursos. O primeiro objetivo sempre foi alcançado em um sentido amplo, ou seja, defender a população de outros humanos e dos eventos naturais. Com foco nas atividades humanas, essa abordagem defensiva também foi aplicada à drenagem urbana, o que resultou numa subestimação dos impactos da urbanização nos sistemas naturais (La Loggia *et al.*, 2020).

Uma das consequências da urbanização é o aumento de superfícies impermeáveis: estradas, calçadas, estacionamentos e prédios, que cobrem áreas antes naturalmente permeáveis. Também pode-se citar a modificação dos caminhos de fluxo natural em valetas pavimentadas, bueiros ou outros elementos de drenagem artificial. A urbanização muda a resposta geral da bacia hidrográfica à precipitação, de modo que bacias hidrográficas urbanas desenvolvidas geram maiores volumes de escoamento e com maiores caudais de ponta (Anker *et al.*, 2019).

Em um cenário de chuvada de baixa a média intensidade/volume, a impermeabilização pode ser considerada o principal fator que a urbanização mal planejada causa e que afeta de forma negativa o sistema de drenagem, pois impede, parcial ou totalmente, a infiltração da água pluvial no solo. Sendo impedida de infiltrar, a água escoar superficialmente, aumentando significativamente o volume e a velocidade de escoamento. Dessa forma, o ciclo hidrológico é afetado, pois quando a água pluvial precipita sofre algumas perdas como a evaporação, evapotranspiração (através das plantas) e a infiltração no solo. A parcela remanescente escoar pela superfície. Vale salientar que em outro cenário, onde a chuvada com muita intensidade/volume a impermeabilização não interfere, pois se este tipo de chuvada ultrapassar a capacidade de infiltração do solo, a água que conseguirá infiltrar será menor do que a precipitação.

Além da impermeabilização, alguns fatores podem interferir na parcela da água que escoar superficialmente, podendo estes fatores serem de origem natural ou fisiográfico, conforme verifica-se no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Fatores que influenciam o escoamento superficial. Padrão (2016), citando Chow (1988).

<b>Grupo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fatores</b>
Climáticos	Precipitação	Modalidade (chuva, neve, granizo, orvalho, neblina ou geada), distribuição no tempo e no espaço, frequência de ocorrência, direção dominante das tempestades, precipitação precedente e humidade do solo.
	Evaporação	Temperatura, vento, pressão atmosférica, natureza e superfície de evaporação.
	Transpiração	Temperatura, radiação solar, vento, humidade do ar e do solo e tipo de vegetação.
Fisiográficos	Características da bacia	Geométricas - Formas, tamanho, declive, orientação e elevação. Físicas - Coberturas e utilização do solo, tipo de solo, infiltração, permeabilidade, topografia e capacidade de formar toalhas freáticas.
	Características dos cursos de água	Capacidade de escoamento - Dimensão e forma da seção transversal, declive, rugosidade, características da rede hidrográfica e comprimento do curso de água. Capacidade de armazenamento.

De acordo com FIRSWG (1998), citado por USEPA (2005), numa superfície totalmente natural cerca de 50% da água precipitada infiltra no solo, 40% evapora e apenas 10% escoar superficialmente. Quando a superfície é alterada e tem de 75% a 100% da superfície impermeável, apenas 15% da água precipitada infiltra, 30% evapora e 55%

escoa superficialmente, esses valores podem variar conforme a intensidade da precipitação. Nas Figuras 2.4 e 2.5 tem-se a representação dos cenários mencionados.

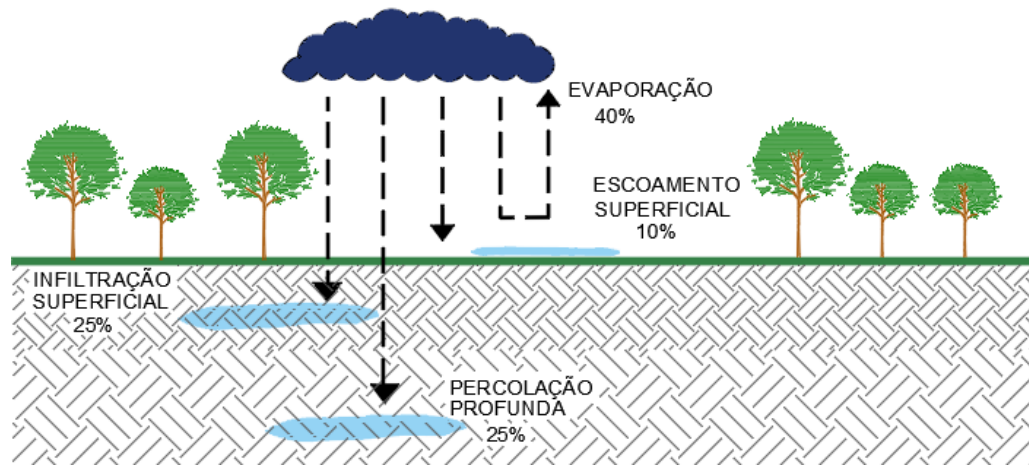


Figura 2.4 – Impacto da urbanização no ciclo da água, considerando a superfície natural.

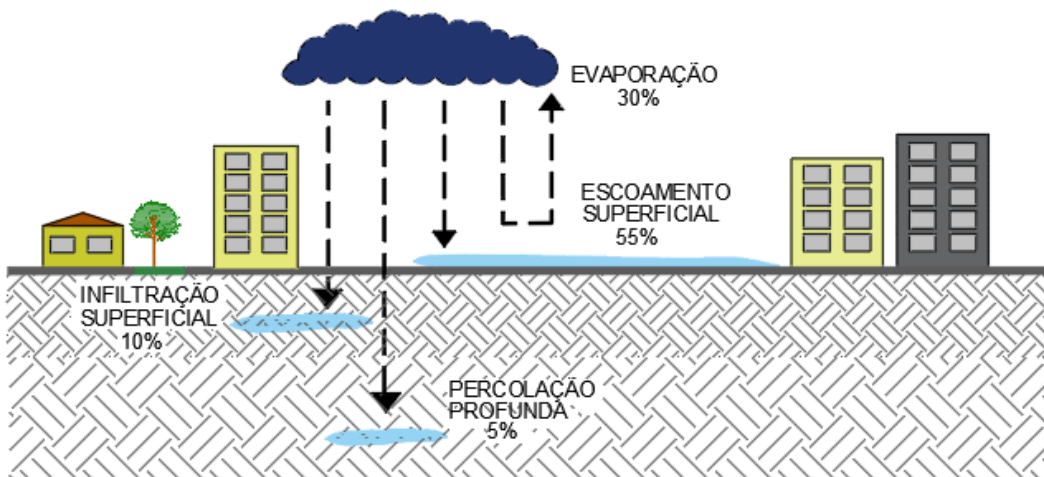


Figura 2.5 – Impacto da urbanização no ciclo da água, considerando 75% a 100% da superfície impermeável.

Conforme a impermeabilização aumenta, o hidrograma de escoamento superficial é afetado, pois o aumento do volume escoado faz o caudal de ponta ser atingido em um tempo menor do que o natural, sobrecarregando os sistemas de drenagem e gerando as inundações. Na Figura 2.6 pode-se verificar a comparação conceitual de um hidrograma antes e após uma urbanização.

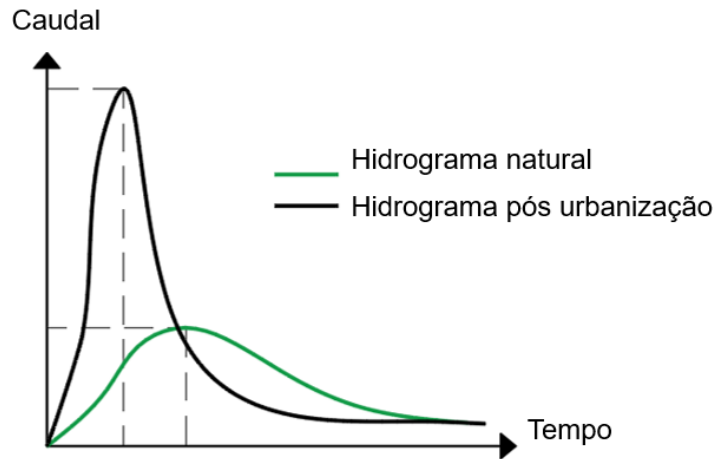


Figura 2.6 - Comparação conceitual entre hidrograma natural e após uma urbanização. O caudal de ponta de uma região que sofreu a urbanização ocorre num tempo muito mais curto do que em um cenário natural. É visível também o maior volume escoado na situação urbanizada quando comparada com a natural.

No Quadro 2.3 verifica-se os principais fatores e efeitos que a urbanização má planeada pode causar.

Quadro 2.3 - Principais efeitos da urbanização na rede de drenagem urbana.

FATORES	EFEITOS
Superfície impermeável	Impede a infiltração da água, aumenta o volume e velocidade do escoamento na superfície, a possibilidade de inundações, bem como o volume na rede de drenagem, propiciando as cheias.
Desmatamento	Reduz a interceptação e retenção da água da chuva, altera o ciclo hidrológico e sem a camada superficial a região torna-se mais susceptível à erosão e à inundação.
Rede de drenagem deficiente	Reduz a qualidade da água, a rede não tem funcionamento conforme foi projetada e aumenta a possibilidade de inundação.
Lixo	Obstruí a rede causando acúmulo de água, transmissão de doenças e inundações.

O aumento repentino da urbanização, faz com que seja necessário um sistema de drenagem capaz de gerir esse novo cenário. Assim, o sistema de drenagem torna-se um dos principais elementos para o bom funcionamento da gestão das águas pluviais e da prevenção de inundação. Contudo, é necessária a integração entre o projeto de drenagem, as futuras construções, a manutenção preventiva, as soluções que mitiguem o impacto na rede de drenagem e as possíveis medidas corretivas.

## 2.5. Conceito tradicional e ambientalista de drenagem de águas pluviais

Com o passar dos anos, a rede de drenagem pluvial não cresceu proporcionalmente ao aumento da urbanização e da impermeabilização, sendo necessário rever o sistema tradicional e criar maior variedade de soluções e materiais para minimizar os impactos das águas pluviais. Deste modo, a drenagem de águas pluviais em meio urbano pode ser analisada através de dois conceitos: a tradicional (ou higienista) e a ambientalista (ou sustentável). No conceito higienista a água precipitada deve ser direcionada para fora do ambiente urbano (maioritariamente a jusante) da forma mais rápida possível, através dos dispositivos condutores. No conceito ambientalista, a água precipitada não tem que ser afastada obrigatoriamente, mas deve ser realizada uma administração de forma sustentável da água, através de medidas que controle o volume do escoamento na superfície e que faça a integração da água precipitada no ambiente urbano.

Como mencionado em Forgiarini *et al.* (2007), citando SNSA (2005), nos países desenvolvidos o planejamento da drenagem urbana passou por mudanças significativas nos últimos quarenta anos. Estas mudanças podem ser definidas em três estágios de planejamento: higienista, corretiva e sustentável.

No Quadro 2.4 tem-se os estágios de desenvolvimento em países desenvolvidos ao longo dos anos.

Quadro 2.4 - Estágios do desenvolvimento da drenagem urbana nos países desenvolvidos (Forgiarini *et al.*, 2007). SNSA (Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental-Brasil).  
\*Período em que iniciou este tipo de visão.

Anos	Período	Características
Até 1970	Higienista (Canais)	Transferência para jusante do escoamento pluvial por canalização
1970 - 1990	Corretiva (Compensatória)	Amortecimento quantitativo da drenagem e controle do impacto existente da qualidade da água pluvial. Envolve principalmente a atuação sobre os impactos
1990* -?	Sustentável	Planeamento da ocupação do espaço urbano, obedecendo aos mecanismos naturais do escoamento; controle dos micros poluentes, da poluição difusa e o desenvolvimento sustentável do escoamento pluvial por meio da recuperação da infiltração

### **2.5.1. Conceito tradicional de drenagem de águas pluviais**

Sob o conceito tradicional, um sistema de drenagem urbana composto por canais, sarjetas e condutas, é projetado para coletar e conduzir um evento extremo (Guo *et al.*, 2020).

Ao dimensionar o sistema tradicional da rede de drenagem são considerados os dados históricos da precipitação da região, normalmente assumindo que estes não serão alterados futuramente. Porém as sucessivas alterações no ambiente, o aumento da urbanização e as alterações climáticas fazem essas redes estarem subdimensionadas, causando um sistema incapaz para receber esse novo volume. De acordo com Benevolo (2006), citado por (Miguez *et al.*, 2017), a abordagem do projeto de drenagem tradicional trabalha para melhorar o transporte do canal, que muitas vezes recai na canalização ou retificações dos cursos de água (com foco na adaptação da rede de drenagem às descargas geradas). Esta abordagem surgiu durante o desenvolvimento da cidade industrial, quando os sistemas de drenagem foram projetados para enfrentar problemas de saneamento, transportando conjuntamente águas pluviais e residuais. O crescimento urbano da cidade industrial ocorreu com pouco controle, levando a várias lacunas de infraestrutura urbana. Embora o conceito higienista relacionado ao desenho tradicional de drenagem urbana fosse importante para equacionar os problemas de saúde pública da época, essa abordagem se mostrou insustentável, principalmente quando o processo de urbanização se intensificou. A própria urbanização limita o alargamento da canalização do rio. Uma vez que o crescimento da cidade aumenta a geração de fluxo, esta abordagem tende a transferir os problemas para a área de jusante da bacia.

A Figura 2.7 representa alguns elementos de uma rede de drenagem urbana, como: galerias de rede pluvial, boca de lobo e ramal de ligação.



Figura 2.7 – Alguns elementos utilizados em um sistema de drenagem urbana (Aqualuz,2013).

Um dos principais problemas relacionados aos sistemas de drenagem urbana são os eventos frequentes de inundações. Vários fatores podem causar esses eventos, como dimensões das condutas, falhas estruturais no sistema, objetos que causam obstruções ou um aumento na intensidade da chuva devido às mudanças climáticas, que induzem ao aumento do caudal escoando (Ngamaliu-Nengoue *et al.*, 2019). Dessa forma, para ter o sistema convencional adequado ao novo cenário, é necessário a realização de melhorias e a expansão da rede, porém, nem sempre há espaço suficiente para essas adequações na área urbanizada. Tentando diminuir o impacto sobre a rede de drenagem pluvial devido a urbanização mal planejada e para evitar as inundações, surge a drenagem baseada no desenvolvimento ambientalista.

### 2.5.2. Conceito ambientalista de drenagem de águas pluviais

Sob o conceito ambientalista (ou sustentável) um sistema de drenagem urbana deve ser projetado para simular o sistema de fluxo natural que transmite o espectro completo dos fluxos de escoamento (Guo *et al.*, 2020).

Para Fletcher *et al.* (2015) em qualquer área o desenvolvimento da terminologia profissional – muitas vezes referida como gíria – serve para melhorar a eficiência da comunicação entre os profissionais da área específica. Na gestão da drenagem urbana, o desenvolvimento e uso da terminologia se deu de forma mais informal, impulsionada por perspectivas, entendimentos e contextos locais e regionais. Na drenagem ambientalista a terminologia também varia conforme a região:

- a) Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentáveis - (SUDS) – Portugal;

- b) Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto – (LID) – Brasil;
- c) *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) – Reino Unido;
- d) *Low Impact Development* (LID) – Estados Unidos da América;
- e) *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) – Australia.

Fletcher *et al.*,(2015) realiza uma explicação da origem dos termos citados acima e como são utilizados em algumas das regiões. Vale citar que outros termos também podem ser utilizados para a designação de drenagem ambientalista como BMP (*Best Management Practices*), SQIDs (*Stormwater Quality Improvement Devices*), ATs (*Alternative Techniques*), cada um com seu significado e variando conforme região.

- Acredita-se que foi Jim Conlin da Scottish Water quem primeiro (outubro de 1997) utilizou o termo *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) para descrever a tecnologia de águas pluviais. Na prática do Reino Unido, o SUDS consiste numa variedade de tecnologias e técnicas usadas para drenar águas pluviais/águas superficiais de uma maneira mais sustentável do que as soluções convencionais.
- O termo *Low Impact Development* (LID) tem sido mais comumente utilizado na América do Norte e na Nova Zelândia. Parece ter sido usado pela primeira vez por Barlow *et al.* (1977) em um relatório sobre planeamento do uso da terra em Vermont, EUA. Os princípios do LID variaram conforme os anos, sendo inicialmente a tentativa de simular a hidrologia natural, e atualmente pode se ter o significado compreendido como um impacto implicitamente inferior ao da prática normal.
- O termo *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) começou a ser usado na década de 1990 na Austrália, com a primeira referência conhecida por Mouritz (1992) e logo depois em um relatório preparado para o *Western Australian Government* por Whelans *et al.* (1994). Entre os seus princípios incluíam o balanço hídrico (considerando águas subterrâneas e caudais, juntamente com danos por inundações e erosão hidrovial), manter e, sempre que possível, melhorar a qualidade da água.

Como esta dissertação foi realizada em Portugal, o termo a ser utilizado para falar sobre a drenagem ambientalista será SUDS. Nos últimos anos, o desenvolvimento dos SUDS tem sido considerado como uma estratégia promissora e eficaz para a redução do escoamento urbano, mitigação da poluição e promoção do desempenho da rede de

drenagem. As instalações dos SUDS são medidas descentralizadas e em micro escala que imitam a pré-urbanização, e as características hidrológicas de certos locais, como telhados verdes, pavimentos impermeáveis, captação de água da chuva de coberturas, tanques de retenção, *etc.* As práticas SUDS podem aliviar a pressão sobre as redes de drenagem, e são comprovadamente eficazes para minimizar as inundações urbanas e reduzir as taxas de fluxo de ponta (Zeng *et al.*, 2019 ; Taji & Regulwar, 2019).

Na Figura 2.8 é possível verificar alguns exemplos de medidas utilizadas nos SUDS. Na Figura 2.9 tem-se a comparação conceitual entre um hidrograma de um pré desenvolvimento urbano, um utilizando SUDS e de um desenvolvimento utilizando o conceito higienista.



Figura 2.8 - Exemplos de técnicas SUDS frequentemente usadas para diferentes tipos de desenvolvimento urbano (Woods-Ballard *et al.*, 2015).

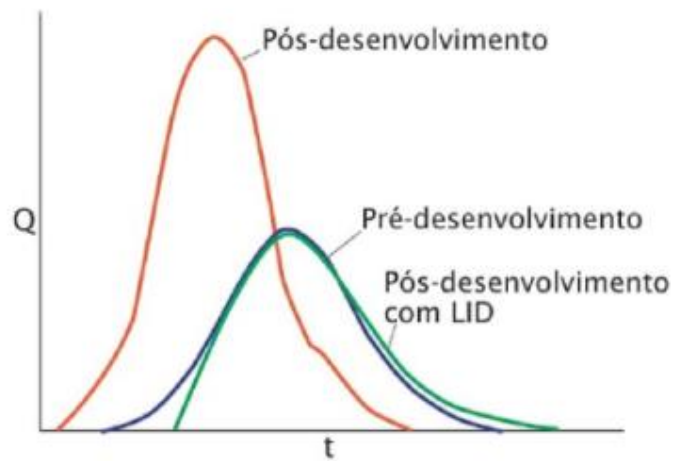


Figura 2.9 - Comparação conceitual entre os hidrogramas de pré desenvolvimento (azul), após desenvolvimento utilizando o sistema LID (verde) e utilizando o sistema higienista (vermelha) (Canholi, 2014).

## 2.6. Modelação hidrológica e hidráulica

Nas últimas décadas, a simulação de diferentes processos hidráulicos e hidrológicos tem-se mostrado uma ferramenta muito útil tanto na prevenção de riscos, quanto na gestão de suas consequências (Fernández-Pato *et al.*, 2019).

Os modelos hidrológicos são utilizados para a simulação do processo precipitação-escoamento e para a obtenção de caudal de uma determinada seção (*e.g.*, de uma bacia ou de um rio). Os modelos hidráulicos são utilizados quando pretende-se obter resultados sobre a velocidade do escoamento, a área inundada e profundidade da água, por exemplo.

Segundo Feng *et al.* (2020), várias abordagens com diferentes perspectivas já foram usadas para obter mapas de risco de inundação. Em geral, duas abordagens comumente usadas no mapeamento de risco de inundação são os modelos hidrológicos e hidráulicos. Modelos hidrológicos são frequentemente usados em estudos de grande escala (pois eles calculam a quantidade total de escoamento de água em certas áreas por exemplo, bacias hidrográficas). Os modelos hidráulicos consideram as propriedades físicas da água, como altura e velocidade do escoamento (*e.g.*, num tubo, superfície ou em um canal). As aplicações utilizadas nesta dissertação, SWMM e Iber, realizam a modelação hidrológica e hidráulica.

O acoplamento dos modelos hidrológico-hidráulicos está no centro dos modelos de previsão de inundação e avaliação de risco. No entanto, cada modelo está sujeito a incertezas de diferentes fontes (*e.g.*, estrutura do modelo, parâmetros e dados de entrada). Compreender como as incertezas se propagam através da modelação é essencial para investir na coleta de dados, aumentar a precisão da modelação de inundação e comunicar de forma abrangente os resultados da modelação aos utilizadores finais (Grimaldi *et al.*, 2019).

Diante disso, permite-se afirmar que modelação baseada em princípios físicos é atualmente uma boa forma de estudar e simular situações reais em vários cenários, prevenir cheias, dimensionar sistemas de drenagem, e corrigir condicionantes urbanas que frequentemente resultam em cheias. Em seguida, estas duas formas de modelação (hidrológica e hidráulica) serão discutidas com maiores pormenores.

### 2.6.1. Modelação hidrológica

«A hidrologia é um ramo da ciência que lida com a ocorrência, distribuição e circulação dos recursos hídricos globais, bem como suas características físicas, químicas e como eles reagem ao meio ambiente (incluindo sua relação com organismos bióticos). Existem vários usos práticos diretamente associados à ciência da hidrologia, *e.g.*, gestão de desastres de inundação, planeamento para abastecimento de água, projeto e operação de estruturas hidráulicas, redução da poluição, tratamento de águas residuais, irrigação, erosão e controle de sedimentos, entre outros. Em geral, a hidrologia orienta o planeamento, a gestão e o controle dos recursos hídricos por meio da aplicação de princípios fundamentais de engenharia e geografia para seu estudo» (Abdulkareem *et al.*, 2018).

A modelação hidrológica tem a capacidade de simular a realidade do comportamento do escoamento do fluxo na superfície ou no subterrâneo de uma bacia hidrográfica, considerando as suas propriedades hidrológicas, *e.g.*, a área impermeável, as características da chuva e a capacidade de infiltração no solo.

Modelos hidrológicos são capazes de representar matematicamente os diversos processos físicos, como a transformação de chuva em escoamento, a evapotranspiração, o armazenamento de água no solo, e a propagação de ondas de cheias ao longo da rede de drenagem de bacias hidrográficas, sendo ferramentas úteis em diversos tipos de análises hidrológicas. Entre os estudos em que são aplicados estes modelos estão: avaliação de impactos de mudanças e variabilidades climáticas sobre o regime hidrológico; análises do impacto de mudanças da vegetação ou do uso da terra sobre as vazões dos rios; previsões de caudais em tempo real e estimativa de caudais em locais sem dados (PONTES *et al.*, 2015). De acordo com Almeida & Serra (2017), através da aplicação de princípios de uma ou mais teorias e conceitos, os modelos hidrológicos são capazes de reproduzir os fenômenos hídricos dentro de uma escala de tempo definida, estimando componentes do fluxo hidrológico, anteriormente desconhecidos ou não quantificados.

Os modelos hidrológicos são desenvolvidos de forma que, quando inseridos dados de boa qualidade, darão bons resultados de simulação, e o inverso também ocorre. Em resumo, os resultados do modelo hidrológico têm grande dependência da qualidade dos dados de entrada (Abdulkareem *et al.*, 2018). Na modelação hidrológica, nunca é possível obter um ajuste perfeito do modelo. Isso se deve em parte a complexidade dos processos

na natureza e a outra parte devido a erros nas observações dos dados de condução e escoamento de água (Seibert *et al.*, 2019).

Como resultado, vários modelos foram desenvolvidos para simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica para modelação de águas superficiais e subterrâneas. A classificação dos modelos hidrológicos pode ser dividida em determinísticos, estocásticos e conjuntos estocásticos-determinísticos. Os modelos determinísticos são subdivididos em modelo baseado em física, modelo conceitual e modelo empírico. Essa classificação pode ser aplicada a modelos de bacias hidrográficas, bem como a modelos de um único componente, como os modelos de águas subterrâneas (Abdulkareem *et al.*, 2018;Devi *et al.*, 2015).

A Figura 2.11 apresenta um esquema das classificações dos modelos hidrológicos.

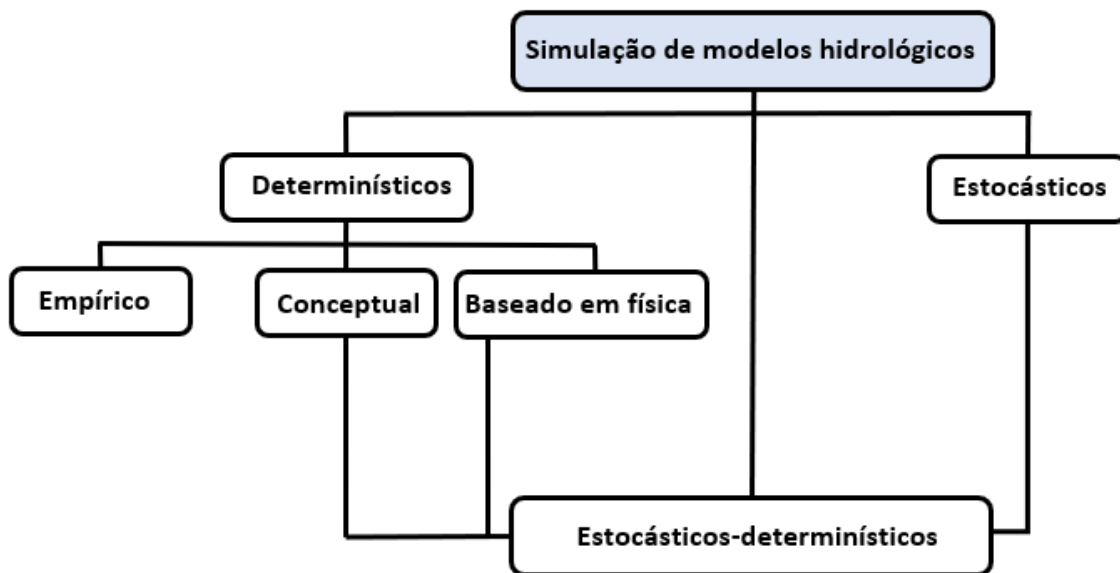


Figura 2.11 - Classificação dos modelos hidrológicos de acordo com o processo de descrição. Adaptado de (Abdulkareem *et al.*, 2018).

- Modelos determinísticos: Nestes modelos uma unidade de parâmetros de entrada produzirá a mesma saída, e podem ser classificados de acordo com a descrição de uma bacia hidrográfica. Eles também podem ser descritos com base nos processos hidrológicos na bacia hidrográfica, sejam eles de base física, empírica ou conceitual.
- Baseados em física: Esses modelos requerem parâmetros que podem ser medidos e dependem do tempo e do espaço, possuem requisitos mínimos de dados hidrológicos e meteorológicos para fins de calibração, mas envolvem a estimativa de várias variáveis que representam as características físicas de uma bacia, como

teor de humidade do solo, profundidade inicial da água, topografia, topologia, *etc.* Nestes modelos os processos hidrológicos que envolvem o movimento da água e da energia são avaliados a partir de equações diferenciais parciais, por exemplo, a equação de Boussinesq para o fluxo da água subterrânea e as equações de Saint-Venant para o trajeto terrestre e de canais. As saídas deste tipo de modelos são mais abrangentes e precisas do que as de outras classes de modelos.

- **Conceptuais:** Estes modelos descrevem todos os componentes dos processos hidrológicos. Consiste numa série de reservatórios interconectados que representam os elementos físicos numa bacia hidrográfica, em que são recarregados pela chuva, infiltração, percolação e são esvaziados por evaporação, escoamento, drenagem, *etc.* Neste método são usadas equações semiempíricas e os parâmetros do modelo são avaliados não apenas a partir de dados de campo, mas também por meio de calibração. Grandes registros meteorológicos e hidrológicos são necessários para calibração.
- **Empíricos:** Estes são modelos baseados apenas em informações dos dados existentes, sem considerar as características e os processos do sistema hidrológico. Envolvem equações matemáticas derivadas de séries temporais de entrada e saída simultâneas, e não dos processos físicos da bacia. Estes modelos são válidos apenas dentro dos limites, um método utilizado por exemplo, é o hidrograma unitário.
- **Modelos estocásticos:** Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Por exemplo, o nível futuro de um reservatório depende do caudal afluente futuro, que é uma variável aleatória com uma dada distribuição de probabilidade. Caso os conceitos de probabilidade sejam negligenciados durante a elaboração de um modelo, este será denominado determinístico. Estes modelos fazem uso das séries observadas de caudais em determinados pontos e, a partir de certas hipóteses sobre seu comportamento, permitem que estas sejam representadas por um dos diversos tipos de modelos de séries temporais normalmente utilizados (Almeida & Serra, 2017).

No Quadro 2.5 tem-se um resumo dos modelos determinísticos: empíricos, conceituais e baseados em física.

Quadro 2.5 – Resumo das características dos modelos: empírico, conceitual e baseado em física. Adaptado (Devi *et al.*, 2015).

<b>Modelo Empírico</b>	<b>Modelo conceitual</b>	<b>Modelo baseado em física</b>
Envolve equações matemáticas, deduz valor da série temporal disponível.	Com base na modelação de reservatórios e inclui equações semiempíricas com uma base física.	Com base na distribuição espacial, avaliação de parâmetros que descrevem características físicas.
Pouca consideração de recursos e processos do sistema	Os parâmetros são derivados de dados de campo e calibração.	Requer dados sobre o estado inicial do modelo e morfologia de captação.
Alto poder de previsão, baixo explicação de profundidade.	Simple e pode ser facilmente implementado em código de computador.	Modelo complexo. Requer experiência humana e capacidade de computação.
Não pode ser gerado para outras bacias.	Requer grande dados de hidrologia e meteorológicos.	Sofre de problemas relacionados à escala.
Válido dentro do limite de dado domínio.	A calibração envolve fazer o ajuste da curva, difícil interpretação física.	Válido para uma ampla variedade de situações.

No Quadro 2.6 verifica-se alguns tipos de modelos, características e usos na modelação hidrológica.

Quadro 2.6 - Tipos de modelos, características e usos da modelação hidrológica (Almeida & Serra, 2017).

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Usos
Chuva-caudal	Determinístico Empírico Conceptual	Comportamento	Calcula o caudal de uma bacia a partir da precipitação	Extensão de séries de caudais, dimensionamento, previsão em tempo atual, avaliação do uso da terra.
Caudal-caudal	Determinístico Empírico Conceptual		Calcula o caudal de uma seção a partir de um ponto a montante	Extensão de séries de caudais, dimensionamento, previsão de cheia.
Geração-estocástica de caudal	Estocástico		Calcula o caudal com base nas características da série histórica	Dimensionamento do volume de um reservatório
Fluxo-saturado	Determinístico		Determina o movimento, caudal, potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento, etc.	Capacidade de bombeamento, nível do lençol freático, iteração rio-aquífero, etc.
Hidrodinâmico	Determinístico		Sintetiza caudais em rios e rede de canais	Simulação de alterações do sistema, efeitos de escoamento de jusante.
Qualidade da água (de rios e reservatórios)	Determinístico		Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água.	Impacto de efluentes, eutrofização de reservatórios, condições ambientais.
Rede de canais e condutos	Determinístico	Comportamento e otimização	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto	Rede de abastecimento de água, rede de irrigação
Operação de reservatório	Estocástico Determinístico		Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	Usos múltiplos.
Planeamento e gestão de sistemas múltiplos	Estocástico Determinístico	Comportamento, otimização e planeamento	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial, etc.

### 2.6.2. Modelação hidráulica

Uma das principais vantagens dos modelos hidráulicos é que eles permitem simular o escoamento com base na topografia do canal e da planície de inundação, de acordo com princípios de continuidade e com o uso de poucos parâmetros (Nguyen *et al.*, 2016).

A modelação hidráulica requer informações para uma adequada representatividade das áreas inundadas, tais como: (a) dados ou estimativas de caudais a montante do trecho e (b) boa qualidade de dados topo batimétricos da região de estudo. Deficiências nos dados topo-batimétricos podem promover problemas na representação das áreas inundadas pelo modelo hidráulico, devido à representação inadequada do fundo do canal do rio e da morfologia da região no entorno do curso d'água (Monte *et al.*, 2016).

Para a realização do mapeamento de inundações comumente são utilizados modelos matemáticos hidráulicos unidimensionais (1D) e bidimensional (2D), para representar fenômenos envolvidos de ordem hidráulica, os quais determinam a cotas (1D e 2D) e as áreas inundadas (2D). Estes modelos hidráulicos podem ser também acoplados à modelos hidrológicos (Monte *et al.*, 2016).

Alguns autores como Martins *et al.*, (2016) e Bulti & Abebe (2020), dividem a rede de estudo da drenagem em dois subsistemas: o principal (macro drenagem) e o secundário (micro drenagem). O principal é utilizado quando a precipitação não consegue entrar no sistema secundário por algum motivo, e então, tem que percorrer a superfície; ou quando o sistema secundário atinge sua capacidade máxima, e o fluxo submerge e percorre uma superfície cuja função principal não é o transporte de fluxo, por exemplo as ruas. O sistema secundário engloba a rede de esgoto, como os tubos e valetas, que tem como função principal transportar o caudal para a foz.

A escolha do método a ser utilizado varia conforme a necessidade, forma de análise do escoamento e os dados disponíveis para o estudo. Estes modelos podem ser analisados através dos seguintes métodos:

a) Rede de coletores: Utilizando esse método admite-se que o escoamento percorre majoritariamente uma direção;

b) Escoamento sobre a superfície: Variando conforme o estudo, o escoamento pode ser analisado com o método 1D ou 2D;

c) Acoplamento: O método considera a integração dos outros dois métodos citados acima, e pode ser estudado de forma 1D-1D ou 1D-2D.

No Quadro 2.7 tem-se as principais características de saída das abordagens de modelação. E no Quadro 2.8 tem-se a precisão, tempo de execução e a escala de aplicação, de acordo com as abordagens.

Quadro 2.7 - Potenciais de abordagens de modelação para representar o processo de fluxo dominante e a provável saída. Adaptado (Bulti & Abebe, 2020). DTM (*Digital Terrain Model*)-modelo digital do terreno.

Método de modelação	Representação escoamento na superfície	Saídas (Características de inundações)				Principais dados necessários
		Localização de inundação	Extensão de inundação	Profundidade de inundação	Velocidade do escoamento	
1D Superfície	Sim, mas apenas na rede de superfície	Não	Sim, mas apenas na rede de superfície	Sim, mas apenas na rede de superfície	Sim, uma direção	DTM, Rede de superfície (sistema principal)
1D Esgoto	Não	Sim	Sim, mas aproximação com armazenamento virtual	Sim, mas aproximação com armazenamento virtual	Não	DTM, Rede de drenagem de águas pluviais (sistema secundário)
2D Superfície	Sim, em 2D	Não	Sim	Sim	Sim, em duas direções	DTM e dados topográficos
1D-1D Acoplado	Sim, mas apenas na rede de superfície	Sim	Sim, mas apenas na rede de superfície	Sim, mas apenas na rede de superfície	Sim, uma direção	DTM, rede de superfície e rede de drenagem de águas pluviais
1D-2D Acoplado	Sim, em 2D	Sim	Sim	Sim	Sim, duas direções	DTM, rede de superfície, rede de esgoto e dados topográficos

Quadro 2.8 - Precisão relativa, requisitos de tempo de execução e escala adequada de aplicações de abordagens de modelação de inundação. Adaptado (Bulti & Abebe, 2020).

Método de modelação	Precisão para análise de risco de inundação	Tempo de execução	Escala espacial adequada de aplicação
1D Superfície 1D Esgoto 2D Superfície 1D-1D Acoplado 1D-2D Acoplado	Baixo ↓ Alto	Um minuto ↓ Horas	Macro ↓ Micro

### 2.6.3. Modelação da rede de coletores

Nessa dissertação não será realizada a modelação dos coletores, porém, julgou-se útil elaborar uma breve descrição sobre este tema.

De acordo com Teng *et al.* (2017), nos canais confinados, nas rede de coletores, em estudo onde uma solução mais detalhada é desnecessária (*e.g.*, o propósito não requer conhecimento em outras dimensões), ou porque o escoamento é significativamente numa direção, a modelação indicada é a unidimensional (1D). Esse método de modelação tenta simular o escoamento pluvial e simplificar as situações quando a capacidade de transporte do sistema é excedida. Ele representa o sistema secundário como um conjunto de trechos (representando as condutas) e nós (representando os poços de visita).

Para Bulti & Abebe (2020), esta abordagem de modelação é adequada para aplicações urbanas, normalmente para planeamento e gestão de drenagem de águas. Também é recomendada para estudos rápidos que não requerem muita precisão de rota de escoamento superficial, incluindo aplicação em tempo real, operação de emergência e alerta precoce.

A Figura 2.11 representa o escoamento em um coletor, podendo ser realizada a modelação 1D.

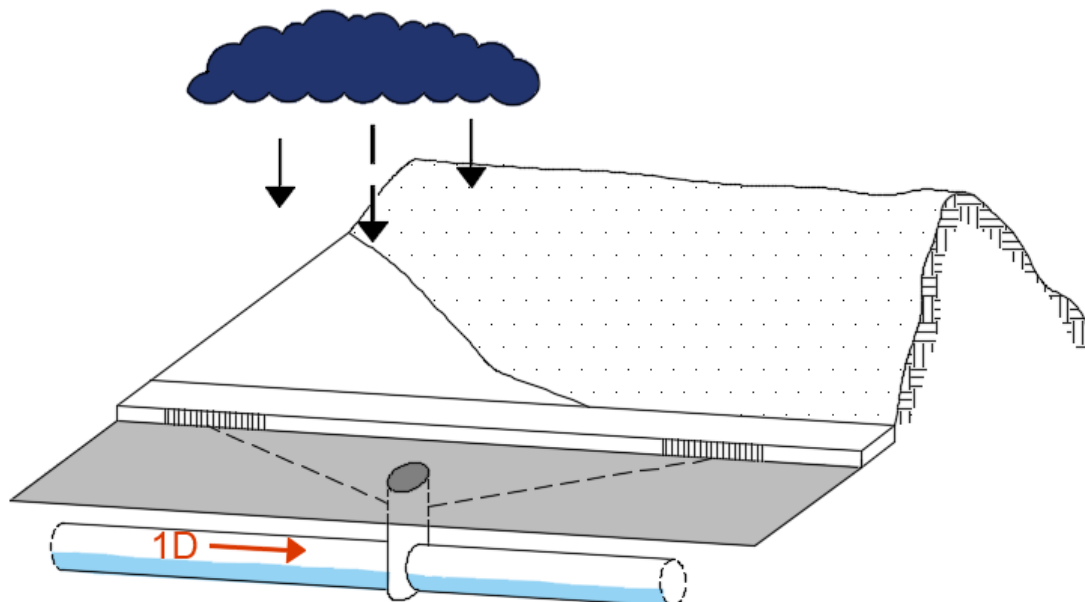


Figura 2.11 - Representação do método 1D, com a análise do escoamento pluvial na rede de conduta secundária.

Os modelos 1D são baseados em esquemas numéricos relativamente simples, mas eficazes, que podem considerar mudanças de regime, leitos de rios com geometrias complexas, e planícies de inundações (simplificadamente) e singularidades como açudes, pontes, passagens subterrâneas, *etc.*

No caso em que o processo a ser estudado é claramente não permanente, as equações devem ser usadas em regime unidimensional gradualmente variável ou equações unidimensionais de Saint Venant (Bladé *et al.*, 2012).

As equações de Saint Venant para canais irregulares apresentam-se da seguinte forma (Ghostine *et al.*, 2015):

$$\frac{\partial U_{1D}}{\partial t} + \frac{\partial F_{1D}}{\partial x} = S_{1D}$$

Onde:

$$U_{1D} = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}; \quad F_{1D} = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + \frac{A^2}{2B} \end{pmatrix}; \quad S_{1D} = \begin{pmatrix} 0 \\ gA_2(S_0 - S_f) \end{pmatrix}$$

Onde:

$U_{1D}$  = Vetor de variáveis conservadas.

$F_{1D}$  = Vetor de fluxo.

$S_{1D}$  = Termo fonte.

A = Área da seção transversal molhada.

Q= Caudal.

$g$  = Gravidade.

$S_0$  =Inclinação do canal.

$S_f$  = Inclinação da linha de energia.

B = Largura do canal.

Essas equações em esquema numérico podem ser escritas da seguinte forma (Ghostine *et al.*, 2015):

$$U_{1D,i}^{n+1} = U_{1D,i}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( F_{1D,i+\frac{1}{2}}^n - F_{1D,i-\frac{1}{2}}^n \right) + \Delta t S_{1D,i}^n$$

Onde:

$F_{1D,i}^n$  = Fluxo numérico.

$S_{1D,i}^n$  = Expressão numérica da integral do termo fonte no volume finito, onde os efeitos da inclinação do leito e rugosidade estão incluídos.

$U_{1D}$  = Vetor de variáveis conservadas.

No modelo unidimensional cada volume finito corresponde a um segmento ou troço de rio de comprimento  $\Delta x$ , e que pode ser representado por uma secção transversal, conforme a Figura 2.12:

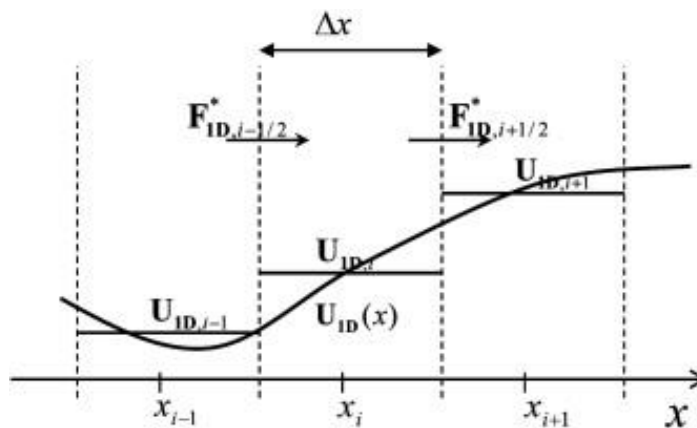


Figura 2.12 - Fluxo unidimensional ( $F_{1D}^n$ ), variando em um troço  $\Delta x$  (Bladé *et al.*, 2012).

#### 2.6.4. Modelação do escoamento superficial

No estudo do escoamento superficial, pode realizar-se o estudo através da modelação 1D ou 2D, conforme os dados disponíveis e o programa computacional a ser utilizado. Considerando o método 1D, admite-se que o escoamento segue somente numa direção, como foi admitido numa das análises desta dissertação ao transformar uma rua no canal (através do SWMM). Conforme Sañudo *et al.*, (2020), a modelação de uma rua como um canal aberto, é uma abordagem sensata desde que as velocidades da água apresentem numa direção preferencial. Na modelação do escoamento na superfície utilizando o método 2D, admite-se que o escoamento segue em várias direções, sendo esta, a segunda análise utilizada nessa dissertação (através do Iber).

Desta forma, a modelação 1D além de ser utilizada na modelação de condutas, também podem ser usada para modelar o escoamento de planície de inundação de

superfície aberta, caso em que o escoamento de planície de inundação faz parte do escoamento do canal unidimensional, é assumido estar numa direção paralela ao canal principal e uma velocidade média de seção transversal é usada para representar grandes variações na velocidade ao longo da planície de inundação (Teng *et al.*, 2017)

A modelação 2D do escoamento superficial tenta simular a propagação do escoamento na superfície, levando em consideração os dois componentes ortogonais do fluxo. Nesta abordagem, a captação é discretizada como uma malha estruturada ou não estruturada de células de grade hidráulica. A malha estruturada geralmente consiste em células quadrilaterais, enquanto o tipo não estruturado é composto de células triangulares ou triangulares e quadrilaterais mistas (Kim *et al.*, 2014). Cada célula da grade é representada por um ponto com coordenadas (X, Y, Z), e os parâmetros de captação e precipitação são considerados espacialmente homogêneos dentro de cada elemento (Rodríguez *et al.*, 2015).

Para a simulação mais precisa do fluxo na superfície, são necessários dados topográficos com maiores precisões. Apesar dos modelos de escoamento de superfície 2D poderem fornecer descrições da propagação do fluxo superficial, eles não fornecem os locais de transbordamento.

A Figura 2.13 representa o escoamento na superfície, podendo ser analisado de forma 1D com o escoamento seguindo na rua; ou de forma 2D com o escoamento sobre a rua e na superfície adjacente.

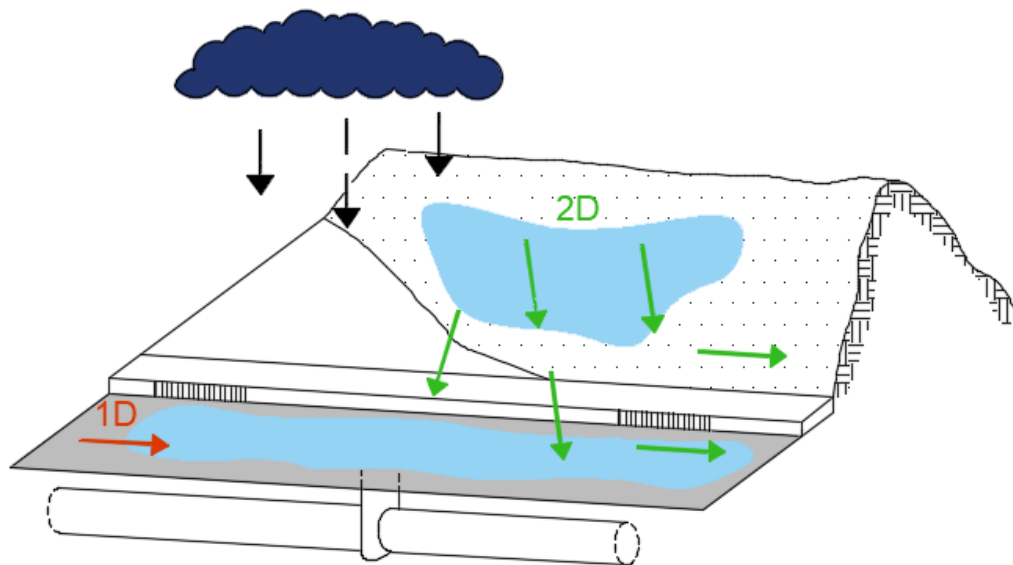


Figura 2.13 - Representação de um escoamento superficial na rede de drenagem primária, sem a contribuição do sistema secundário, e podendo a modelação ser realizada pelo método 1D ou 2D.

Os fluxos de superfície livre são geralmente descritos na hidráulica por meio das equações de águas pouco profundas, assumindo que as dimensões verticais são muito pequenas em comparação com as horizontais (Fernández-Pato *et al.*, 2020).

As equações de Saint Venant para fluxos bidimensionais, apresentam-se da seguinte forma (Ghostine *et al.*, 2015):

$$\frac{\partial U_{2D}}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S_{2D}$$

Em que:

$$U_{2D} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix} ; \quad E = \begin{pmatrix} h_u \\ h_u^2 + \frac{gh^2}{2} \\ h_{uv} \end{pmatrix} ; \quad G = \begin{pmatrix} h_v \\ h_{uv} \\ h_v^2 + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix}$$

$$S_{2D} = S_0 + S_f = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{0x} \\ ghS_{0y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{pmatrix}$$

Onde:

$S_{2D}$  = Termo fonte.

$h$  = Profundidade.

$U_{2D}$  = Vetor de variáveis conservadas.

$E, G$  = Vetores das variáveis de fluxo conservadas e fluxos nas direções x e y, respectivamente

$g$  = Aceleração da gravidade.

$u$  e  $v$  = Componentes de velocidade nas direções x e y.

$S_{0x}$  e  $S_{0y}$  = Inclinação do leito nas direções x e y.

$S_{fx}$  e  $S_{fy}$  = Rugosidade nas direções x e y.

### 2.6.5. Modelos acoplados

Apesar de não existirem modelos dual de livre utilização, este tipo de drenagem, ou seja, o fluxo de água simultâneo não apenas em coletores mas também na superfície, é um aspecto único e importante da hidrologia urbana e tem sido estudado por muitos pesquisadores (Noh *et al.*, 2018).

Um dos trabalhos pioneiros a respeito do acoplamento dos modelos 1D-2D foi o modelo do Rio Mekong em 1975-1976, este método foi posteriormente referido como um modelo 1D quasi-2D (Bladé *et al.*, 2012). Para a drenagem acoplada 1D-1D, segundo Martins *et al.* (2017), uma das primeiras propostas foi realizada por Ellis *et al.* (1982), utilizando a aplicação computacional SWMM para projetar sistemas acoplados 1D/1D, onde os dois sistemas permaneceram separados, embora tenham sido calibrados como se eles trabalhassem em conjunto.

Os modelos acoplados podem ser estudados de forma 1D-1D ou 1D-2D. Estas duas formas de análise assumem que o fluxo na rede de coletores é unidimensional. A diferença reside na modelação da superfície, onde uma forma admite que a superfície é analisada de forma unidimensional, enquanto a outra admite que será em bidimensional. As ligações entre esses modelos correspondem aos dispositivos de entradas e saídas do fluxo, como por exemplo os poços de visita. Na Figura 2.14, tem-se um exemplo de como pode ser feita a análise de um modelo acoplado.

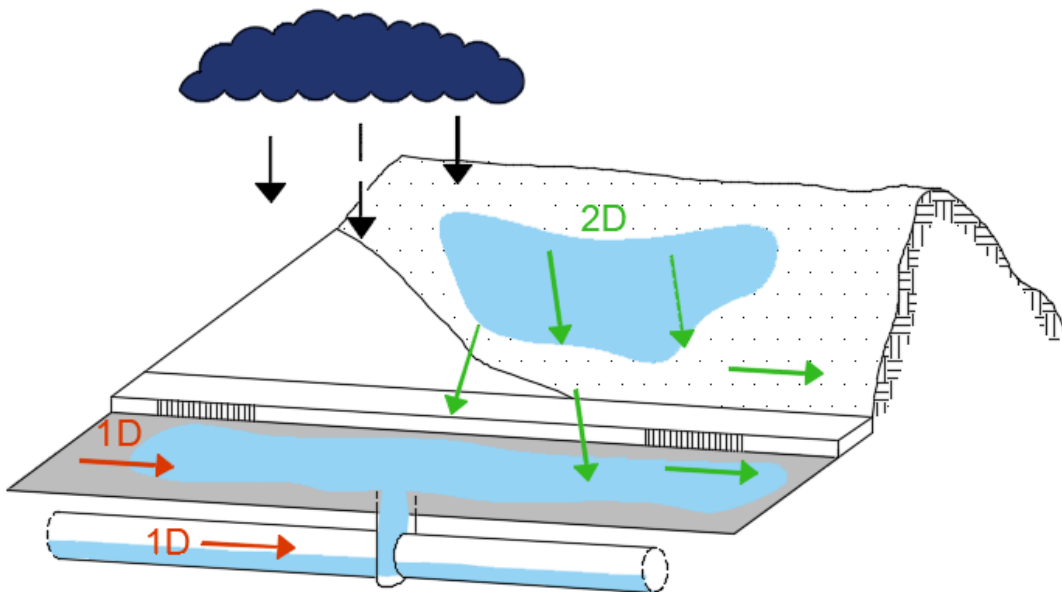


Figura 2.14 – Representação de um modelo acoplado, com fluxo no sistema primário e secundário. Podendo o método de acoplamentos ser analisado em 1D-1D ou 1D-2D.

A escolha do método de acoplamento será influenciada pelo tipo de resultado que se espera e os dados disponíveis para a realização da modelação. Segundo Bulti & Abebe (2020), os métodos 1D-1D e 1D-2D, possuem as seguintes características e limitações:

- O acoplamento 1D-1D é uma condição em que o fluxo unidimensional do sistema menor é acoplado a uma representação unidimensional do fluxo de superfície. Esta abordagem permite determinar o local do transbordamento, a profundidade do fluxo e a velocidade com precisão suficiente, assumindo que os caminhos de fluxo da face são bem definidos. Por outro lado, não é capaz de fornecer as informações de inundação quando a água sai da superfície definida. Assim, este método é indicado para o planeamento e gestão de rede pluvial, alerta prévio e operação de emergência.
- O método de acoplamento 1D-2D permite determinar as informações de inundações (local de transbordamento, extensão, profundidade e velocidade). Os resultados das simulações usando esta técnica são mais precisos do que outros métodos, mas atinge essa precisão ao custo de alta carga computacional em termos de tempo de execução e requisitos de dados de entrada. Isto geralmente é considerado como a principal limitação da abordagem de modelação 1D-2D quando se trata de simulações em tempo real.

## 2.7. Inundações e cheias

Devido a existirem controvérsias no emprego dos termos “inundação” e “cheia”, e por vezes utilizados como sinônimos, faz-se necessário distingui-los, mesmo que suas definições não sejam de comum acordo entre os autores.

Segundo Albrecht Hoffman (2000), o primeiro europeu a tentar explicar as inundações foi Konrad Of Megenberg (1309-1374), que descrevia como um fenômeno de erupções de águas armazenadas no solo (Costa, 2020).

Para Strahler (1975) citado por Costa (2020) e Ramos (2013), uma cheia origina invariavelmente uma inundação. Por outro lado, considera que uma inundação ocorre sempre que há submersão de uma área usualmente emersa e que uma inundação não é necessariamente provocada por uma cheia, e nem que uma cheia provoca sempre uma inundação.

Saraiva & Carvalho (2009) citando Lima (1992), diz que uma cheia é uma inundação temporária provocada pela água de um rio, oceano, lago, ou outro corpo de água sobre terrenos adjacentes, afetando o uso do solo e a normalidade da atividade humana. Podendo assim afirmar que a cheia é a principal causa da inundação. Para Rocha (1995), a cheia “está associada à ocorrência de um valor muito elevado de caudal num curso de água, resultante da ocorrência de precipitação intensa” realçando que, quando a cheia provoca o extravasamento do leito normal, invadindo os terrenos ribeirinhos, ocorre a inundação. Para outro autor, Salomon (1997) citado por Costa (2020), inundação é um fenômeno ocasional que pode alagar vastas áreas do leito de inundação ou da planície aluvial, na sequência de uma cheia particularmente importante e do consequente transbordar das águas.

Do ponto de vista hidrológico, a cheia trata-se de um evento tridimensional, caracterizado pela magnitude, duração e frequência; sendo influenciado por fatores climáticos e fisiográficos (FEMA, 1998). Para Portela (2006), pelo mesmo ponto de vista hidrológico, ocorre uma cheia quando a bacia hidrográfica é alimentada por água de um modo intenso e prolongado, de modo que o caudal resultante aflui à rede hidrográfica e excede a capacidade normal de transporte ao longo desta rede, transbordando as margens naturais ou artificiais e tendo como consequência a inundação das áreas adjacentes.

Já pela perspectiva geográfica (Rodrigues, 2017), define as cheias como sendo «fenómenos hidrológicos extremos, temporários e de frequência variável provocados por precipitações elevadas, fusão de neve ou de gelo, ou outros fatores que conduzam ao

aumento do caudal dos cursos de água, levando ao transbordo do seu leito ordinário e consequente inundação das margens e áreas adjacentes».

De acordo com Flick *et al.*, (2012) o termo cheia (*flood*) é utilizado quando áreas secas se tornam úmidas temporariamente e inundação (*inundation*) é descrito como o processo de uma área seca ser permanentemente submersa.

Pela legislação portuguesa, no Decreto-Lei n.º 115/2010, de 22 de outubro, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2007/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, entende-se inundação como «a cobertura temporária por água de uma parcela do terreno fora do leito normal, resultante de cheias provocadas por fenómenos naturais como a precipitação, incrementando o caudal dos rios, torrentes de montanha e cursos de água efémeros correspondendo estas a cheias fluviais, ou de sobre-elevação do nível das águas do mar nas zonas costeiras». E ainda, considera como leito normal «o terreno ocupado pelas águas com o caudal que resulta da média dos caudais máximos instantâneos anuais, sendo que no caso de águas sujeitas à influência das marés corresponde à zona atingida pela máxima preia-mar das águas vivas equinociais». A Diretiva 2000/60/CE é um ato legislativo que fixa um objetivo geral que todos os países da União Europeia devem alcançar. Sendo que esta estabelece um quadro de ação comunitária no domínio da política da água, exige a elaboração de planos de gestão das bacias hidrográficas para cada região hidrográfica, a fim de se atingir um bom estado ecológico e químico, e contribuirá para a atenuação dos efeitos das inundações.

As Figuras 2.15 e 2.16 representam os vários níveis de um canal e como as margens são afetadas de acordo com a sua ocupação.



Figura 2.15 – Representação do leito normal e de inundação num canal, em ambiente natural. Caso atinja o nível de leito de inundação somente a vegetação será atingida.



Figura 2.16 – Representação do leito normal e de inundação num canal, numa área urbanizada. Nesta situação, quando a água ultrapassa o leito normal atinge as atividades humanas que estão ocupando as margens.

### 2.7.1. Inundações

De acordo com Costa (2020), a classificação do tipo de inundação é uma ferramenta ideal para agrupar inundações associadas a condições meteorológicas semelhantes. Deve-se ter em conta as suas especificidades e a estruturação do risco que lhe está associada, nomeadamente:

- O processo de formação, envolvendo a caracterização das causas e das respetivas ocorrências, e a frequência (probabilidade de ocorrência);
- O percurso e as alterações, ou seja, o processo de propagação de inundação através de linha de água (susceptibilidade);
- A ocupação das áreas sujeitas (susceptibilidade) e expostas ao respetivo impacto, incluindo pessoas, bens materiais e económicos, ambientais;
- As consequências, *e.g.*, o resultado do impacto;
- A percepção social, ou seja, a forma como as populações estão integradas na estratégia de prevenção do risco e na gestão da crise.

De acordo com Ramos (2013) existem 4 tipos de inundações: (a) inundações fluviais ou cheias, (b) inundações de depressões topográficas, (c) inundações costeiras, e (d) inundações urbanas. A Diretiva n.º 2007/60/CE menciona as inundações do tipo (a), (c) e (d), mas acrescenta (e) cheias repentinas.

De modo a abordar essas duas fontes, apresenta-se a seguir os tipos de inundações mencionadas e os fatores causadores. O tipo de inundação (e) cheias repentinas, será abordada com maior pormenor no item 2.4.2.

- Inundação fluvial (ou cheia): é caracterizada pelo transbordamento da água de um curso d'água para o leito maior, que pode estar ocupada pela ação humana. As possíveis causas podem ser a precipitação intensa, efeito de maré, o derretimento da neve, ou obstáculos que impedem o curso natural da água. Este tipo de inundação está representado na Figura 2.17.



Figura 2.17 - Cheia ocorrida no rio Pó, Cremona, Itália. (Cremonaoggi, 2019).

- Inundação de depressões topográficas: acontece devido à subida da toalha freática, pela retenção de água da precipitação por um solo ou substrato geológico de permeabilidade muito reduzida, ou devido as cheias. A Figura 2.18 representa um afloramento da toalha freática que posteriormente provocou lagoas artificiais.



Figura 2.18 - Afloramento da toalha freática provocando lagoas artificiais (Epal, 2018).

- Inundação costeira: ocorre quando há um aumento anormal do nível do mar, sendo capaz de atingir a zona urbanizada. Esse aumento do nível do mar pode ser devido a um tsunami, ao sismo ou ao aumento do nível do mar a nível global. A Figura 2.19 é um exemplo de uma inundação costeira ocorrida em Ovar.



Figura 2.19 - Inundação costeira na praia do Furadouro, Ovar, Portugal (APA, 2020).

- Inundação urbana: a ocorrência de inundações urbanas pode não resultar apenas da precipitação. Marés vivas ou simples situações de preia-mar podem causar, por si só, inundações ou exacerbar os seus efeitos nos setores terminais dos cursos de água e/ou nas áreas baixas costeiras. Também, as rupturas de condutas na via pública e a obstrução das sarjetas por ramos e folhas de árvores ou outros detritos podem provocar inundações e/ou contribuir para a sua existência. Numa perspectiva mais restrita e mais comum, as inundações urbanas podem ser todas as situações verificadas em áreas urbanas e que tenham sido desencadeadas por eventos de precipitação intensa, originando escoamento superficial e a sobrecarga dos sistemas de drenagem. A Figura 2.20 mostra uma inundação urbana ocorrida em São Paulo, Brasil.



Figura 2.20 - Inundação urbana no Morumbi, São Paulo, Brasil (Globo, 2020a)

Os conceitos ligados aos fenômenos naturais e a respectiva abrangência nem sempre são claros, algo que redundando, muitas vezes, em dificuldades na sua aplicação. No que diz respeito ao fenômeno das cheias progressivas e cheias rápidas, este problema não ocorre, pois são conceitos já consolidados cientificamente, algo que não ocorre no universo das inundações urbanas. Estas podem ser consideradas todas as inundações que ocorrem em áreas urbanas, porém, esta perspectiva inclui cheias rápidas, inundações costeiras, inundações pluviais, *etc.* Esta visão generalista não distingue nem os processos hidrológicos nem os fatores desencadeantes, e como tal, não reflete a capacidade destruidora de cada um dos subtipos de inundações incluídos no conceito (Ramos, 2013).

Bard *et al.*, 2010, diz que sem pré-julgar a natureza dos danos causados pelas inundações, podemos diferenciar os tipos de inundação dependendo da fonte de água responsável pelo dano à propriedade, às pessoas ou ao meio ambiente.

- Inundação pluvial: Concentrando-se na topografia, o escoamento que flui rapidamente pode causar grandes danos quer à agricultura, pela perda de terra, quer às infraestruturas humanas que encontra no seu trajeto. O dano é tanto mais importante quanto mais carregadas de sedimentos estiverem as águas de escoamento. A artificialização de solos (edifícios, estradas, parques de estacionamento, *etc.*) ou as práticas agrícolas inadequadas podem limitar a infiltração e aumentar a carga sólida das águas pluvial.

- Inundação fluvial: Quando a precipitação se concentra rapidamente no curso de água e resulta na transposição das águas do leito menor para o leito maior, no qual podem estar localizadas várias atividades e infraestruturas humanas.

### **2.7.2. Cheias**

Ainda que seja algo que causa alguma discussão no meio acadêmico, pressupõem sempre que cheia é a inundação das margens de um curso de água, independentemente da sua importância ou dimensão (Ramos, 2013).

De acordo com a Lei da Água, transpondo para a ordem jurídica nacional a Diretiva n.º 2000/60/CE, define-se margem como «a faixa de terreno contígua ou sobranceira à linha que limita o leito das águas com largura legalmente estabelecida». E também, se define zona ameaçada pelas cheias como «a área contígua à margem de um curso de água que se estende até à linha alcançada pela cheia com período de retorno de 100 anos ou pela maior cheia conhecida, no caso de não existirem dados que permitam identificar a anterior».

Em função das características da precipitação desencadeante e da geomorfologia das bacias hidrográficas, são vários os tipos de cheias que podem ocorrer, sendo fundamental o fator tempo, nomeadamente, cheia lenta (ou progressiva) e cheia rápida (ou repentina). A duração da cheia influencia os possíveis danos que a região afetada pode vir sofrer. Para cheias rápidas, o objetivo prioritário é o de preservar vidas humanas, para inundações lentas é uma questão de essencialmente minimizar o impacto socioeconómico (Ramos, 2013; Costa, 2020; DGSCGC, 2016):

- A cheia lenta: ocorre sobretudo nos rios com grandes bacias hidrográficas e são desencadeadas por períodos de precipitação que se prolongam durante semanas, ou pela fusão da neve. Este tipo de cheia está tipicamente associada a eventos hidrológicos da rede de drenagem natural que transbordam lentamente para o leito de inundação. Trata-se de um processo natural, normalmente com períodos de retorno mais elevados do que as inundações rápidas, e que resulta na ocupação dos leitos de inundação. A subida e descida das águas, pode variar entre várias horas a dias e tem duração de submersão variando entre alguns dias a semanas.

Por ocorrer de forma gradativa, tem-se a possibilidade de alertar e realizar a prevenção da população adjacente da região que será afetada, diminuindo o risco de fatalidades e perdas materiais mais significativas.

- A cheia rápida (ou repentina): é um evento climático de alto impacto que requer uma comunicação clara sobre a gravidade e os riscos potenciais entre meteorologistas, estudiosos, gerentes de emergência e o público em geral (Schroeder *et al.*, 2016). Gaume *et al.* (2016) menciona que cheias rápidas são induzidas por um período de curta duração (menos de uma hora a 24 horas) e eventos convectivos de chuvas fortes (tipicamente 100 mm ou mais de chuva acumulada em algumas horas). As áreas afetadas são frequentemente limitadas a alguns 100 km<sup>2</sup>, com respostas hidrológicas rápidas - geralmente menos de 6 horas de atraso entre a ponta de chuva e a ponta de descarga a jusante. Comparada a cheia lenta, pode-se considerar a cheia rápida como a mais danosa, necessitando de maior prevenção e atenção dos responsáveis. Além da origem natural, as cheias também podem ser causadas por eventos repentinos como o rompimento de tubulação e de barragem.

De acordo com Moreira, (2016), além da divisão entre cheia lenta e rápida, podem considerar as seguintes distinções úteis dos tipos de cheias:

- Cheias ribeirinhas: A precipitação intensa e/ou de longa duração, degelo ou obstáculos, podem fazer com que o escoamento de um curso d'água saia do seu limite natural e invada áreas inapropriadas para isto;
- Cheias costeiras: Ao ocorrer marés altas, tempestades ou tsunamis, o nível normal do mar pode ser ultrapassado e ter como consequência a cheia;
- Cheias do lençol freático: Precipitação constante e aumento do nível do mar, podem fazer a água subterrânea emergir abundantemente em determinados locais, causando este tipo de cheia;
- Cheia devido a falha em barragens: acontecem devido a erros na construção da barragem. Por esse tipo de falha não poder ser prevista e a cheia ocorrer de forma repentina, isso faz com que ocorram grandes desastres;
- Cheia urbana: «As cheias em meio urbano ocorrem essencialmente devido à chuva intensa e à incapacidade do sistema de drenagem para drenar toda a água resultante da precipitação. Como consequência da não entrada de água nos coletores, ou da entrada em carga destes, um volume considerável de água é escoado sobre a superfície através de caminhos preferenciais e pode, eventualmente, acumular-se em zonas baixas. Em situações de precipitação intensa, o sistema de drenagem pode

entrar em carga, isto é, o nível de água atinge o topo do coletor passando o escoamento a ocorrer em pressão» (Simões *et al.*, 2011).

Além das causas, existem alguns fatores que podem potencializar os efeitos das cheias. Esses fatores podem ser de origem natural ou da ação humana. No Quadro 2.9 são identificados esses fatores.

Quadro 2.9 – Fatores, naturais ou de ação humana, agravantes das cheias (Ramos, 2013).

<b>Naturais</b>	<b>Ações humanas</b>
<p><b>Ao nível da bacia hidrográfica:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Substrato geológico de permeabilidade reduzida;</li> <li>- Relevo (declive, desnível, ...);</li> <li>- Rede hidrográfica: densidade, hierarquização, sinuosidade;</li> <li>- Cobertura vegetal: tipo e cobertura.</li> </ul> <p><b>Ao nível dos fundos de vale:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estreitamentos naturais dos vales;</li> <li>- Características do leito de cheia (largura e inclinação);</li> <li>- Obstáculos transportados pelas cheias.</li> </ul>	<p><b>Ao nível da bacia hidrográfica:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Destruição do coberto vegetal nas áreas declivosas;</li> <li>- Práticas agrícolas inadequadas;</li> <li>- Impermeabilização dos solos.</li> </ul> <p><b>Ao nível dos fundos de vale:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestão inadequada das barragens;</li> <li>- Assoreamento dos canais fluviais;</li> <li>- Estrangulamento dos canais fluviais;</li> <li>- Obstáculos perpendiculares ao sentido de escoamento;</li> <li>- Ocupação indevida dos leitos de cheia;</li> <li>- Falta de limpeza dos canais fluviais;</li> <li>- Vazamento indevido de lixo e entulhos;</li> <li>- Encanamento dos cursos de água;</li> <li>- Sistemas de águas pluviais e residuais inadequados.</li> </ul>

E assim, após a apresentação das diferentes definições dos termos “cheia” e “inundação” e de acordo com o tema dessa dissertação, adotou-se para o estudo o significado mencionado por Simões *et al.*, (2011) que em resumo, diz que uma cheia urbana ocorre devido à chuva intensa e incapacidade do sistema de drenagem de drenar a água resultante da precipitação.

## 2.8. Desastres naturais

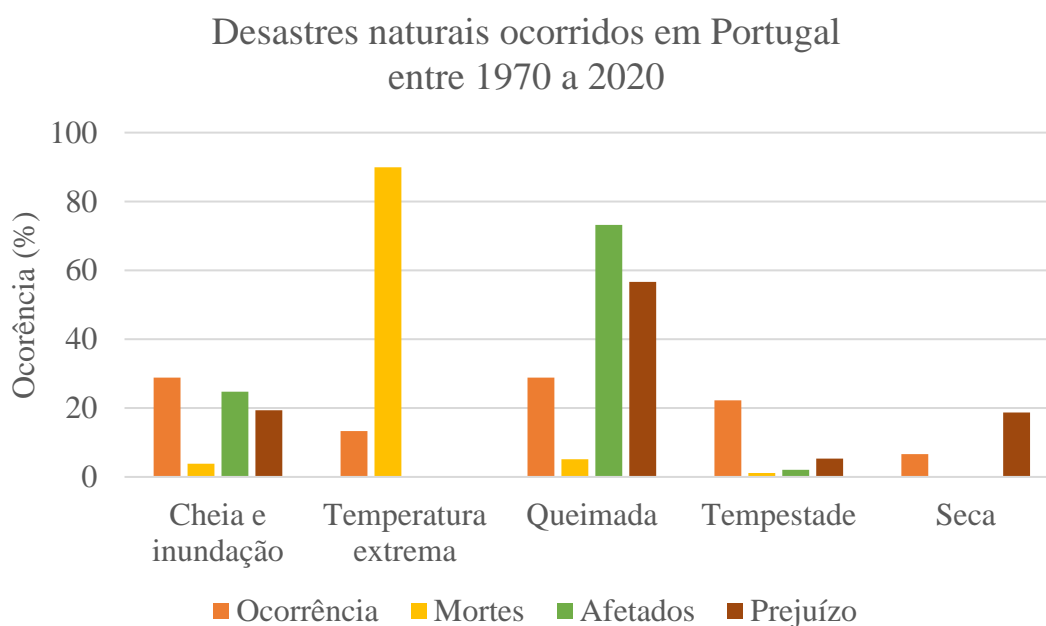
As inundações podem ter como consequência impactos diretos ou indiretos sobre a saúde, podendo ser de curto, médio ou longo prazo. Há danos materiais na infraestrutura urbana, traumas físicos e psicológicos, óbitos e doenças levadas pela água: leptospirose, doenças diarreicas, tétano acidental, choques elétricos, além de agravos à saúde como

transtornos psicossociais, estresse pós-trauma, insônia, fobias e depressão (Christofidis *et al.*, 2019).

Segundo os dados da EM-DAT (*The International Disaster Database*), no período entre 1970 e 2020 no mundo ocorreram 5.112 eventos de cheias e inundações, que resultaram em 3,8 mil milhões de pessoas afetadas, 328.613 vidas humanas perdidas, e cerca de 872 milhões de dólares em prejuízos económicos. Em Portugal, nesse mesmo período, ocorreram 46 desastres naturais, variando entre incêndios florestais, cheias, tempestade, seca, onda de calor e de frio. Nestes desastres, 13 estavam relacionados a cheias e inundações, que afetaram cerca de 52.434 pessoas e causaram 1,5 milhões de dólares em prejuízos. A EM-DAT, consiste numa base de dados de desastres internacionais, (fornece dados de desastres de origem natural, tecnológica e complexos), e considera um desastre se cumprir um dos seguintes critérios: (a) 10 ou mais vítimas mortais, (b) 100 ou mais de pessoas afetadas, (c) declaração de estado de emergência, pedido de ajuda internacional.

No Quadro 2.10 verifica-se que entre 1970 e 2020, a cheia e a inundação, juntamente com a queimada, foram os desastres naturais que mais ocorreram. Juntas, equivalem a 56% dos desastres naturais no período mencionado. A temperatura extrema foi o desastre natural que mais causou mortes neste período, sendo responsável por cerca de 90%.

Quadro 2.10 - Desastres naturais ocorridos em Portugal, entre os anos 1970 a 2020, valores em percentagem. Dados acessados em novembro de 2021, na base de dados da EM-DAT.



## 2.9. Consequências das alterações climáticas na drenagem pluvial

O clima num sentido restrito é geralmente definido como a descrição estatística em termos da média e variabilidade de quantidades relevantes ao longo de um período de tempo que varia de meses a milhares ou milhões de anos. O período clássico para calcular a média dessas variáveis é de 30 anos, conforme definido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO). As quantidades relevantes são na maioria das vezes variáveis de superfície, como temperatura, precipitação ou vento. Clima, num sentido mais amplo, é o estado incluindo uma descrição estatística, do sistema climático (IPCC, 2021).

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, define mudança climática como «uma mudança do clima que é atribuída direta ou indiretamente à atividade humana que altera a composição da atmosfera global e que se soma à variabilidade climática natural observada em períodos de tempo comparáveis» (UNFCCC, 1992).

As mudanças climáticas afetam a intensidade e a frequência dos fenômenos meteorológicos dos dias atuais, incluindo um aumento gradual nas intensidades das precipitações ao redor do mundo, fazendo com que sistemas projetados inicialmente comecem a falhar (Ngamaliou-Nengoue *et al.*, 2019). Como citado por Hasan *et al.* (2019), um sistema de drenagem convencional é calculado com base em dados históricos de precipitação, assumindo que a frequência e intensidade permanecerão inalterado ao longo da vida do sistema projetado. Uma vez que a mudança climática resulta em alterar estes dados, a suposição torna-se incorreta e a capacidade da rede torna-se incapaz para acomodar o aumento da chuva.

As atividades humanas tem contribuído para as alterações climáticas (IPCC, 2021). O efeito estufa é essencial para a manutenção da vida, mas a atividade humana intensificou de forma negativa esse efeito dando resultados preocupantes a sobrevivência na Terra. Esse efeito acontece de forma natural e previne que a temperatura na Terra seja muito baixa, mas ele está sendo afetado de forma negativa pelo excesso de gases lançados no meio ambiente (por indústrias, meios de transporte, queimadas, *etc...*), e que ficam presos na atmosfera criando uma barreira. Esta, por sua vez, absorve o calor do sol e o impede de sair para o espaço, como o mecanismo de uma estufa, tendo como consequência muitas alterações no clima.

Com as alterações climáticas, como já mencionado, há diversas consequências no ambiente e que afetam a vida da população e as infraestruturas. Assim, de acordo com o tema desta dissertação julgou-se necessário a análise dos seguintes tópicos relacionados às alterações climáticas: o aquecimento global, a precipitação intensa, e a elevação do nível do mar.

Os dados sobre as alterações climáticas abaixo citadas foram retirados do relatório do IPCC de 2021. O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, em português Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), foi aprovado pela Assembleia Geral da ONU em 1988. Sua tarefa inicial, conforme descrito na Resolução 43/53 da Assembleia Geral da ONU de 6 de dezembro de 1988, seria preparar uma revisão abrangente de recomendações com respeito ao estado de conhecimento da ciência das mudanças climáticas; o impacto social e econômico da mudança climática, as estratégias de resposta em potencial, e elementos para inclusão numa possível futura convenção internacional sobre o clima. Desde 1988, o IPCC realizou cinco ciclos de avaliações e entregou cinco relatórios, sendo estes os relatórios científicos mais abrangentes sobre mudanças climáticas produzidos a nível mundial.

A Figura 2.21 mostra as mudanças que ocorrerão com os possíveis aumentos da temperatura global, e como isto afetará a nível regional a temperatura, a precipitação e a humidade do solo.

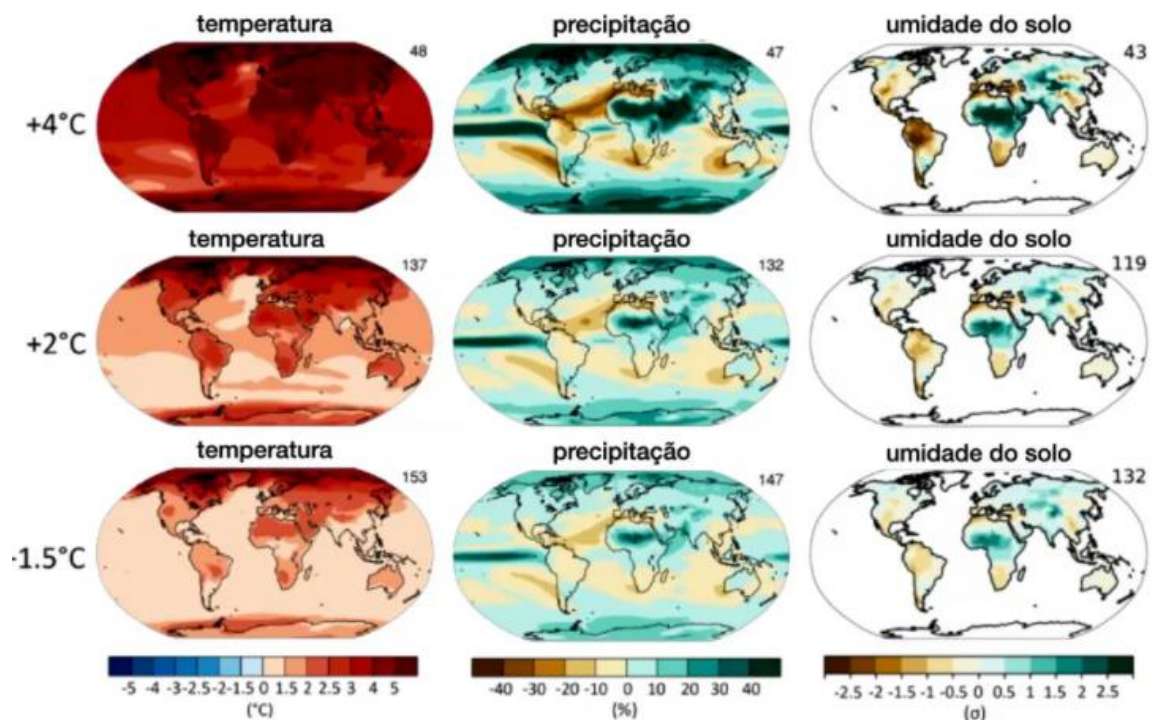


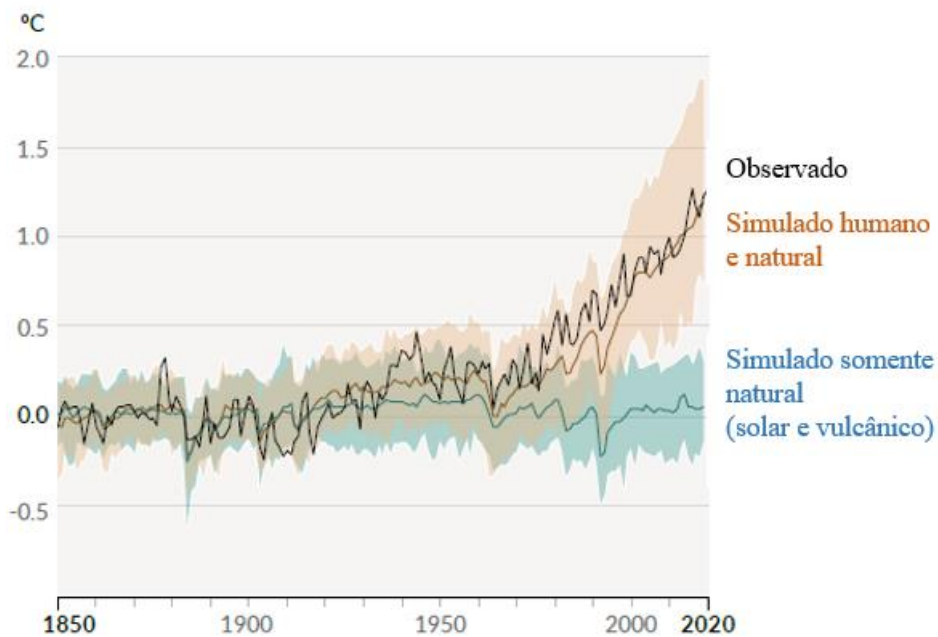
Figura 2.21 – Previsão de mudanças induzidas por diferentes de níveis de aumento de temperatura global: +4°C, +2°C e +1.5°C, segundo IPCC 2021 Adaptado (USP, 2022).

### 2.9.1. Aquecimento global

As últimas quatro décadas foram as mais quentes desde 1850 (período pré industrial), sendo a temperatura da superfície global na década entre 2011 e 2020, 1,09 °C maior do que no período entre 1850-1900 (IPCC, 2021). Neste aumento, estão inclusas as atividades humanas e os fatores naturais. Conforme o Quadro 2.11, é possível verificar que a contribuição humana é muito maior do que os fatores naturais, como por exemplo a atividade vulcânica e solar.

O aumento do aquecimento no globo produz uma intensificação de seu ciclo hidrológico. Como consequência, o risco de cheia aumentará regionalmente nas próximas duas décadas devido ao aquecimento atmosférico, causado pelas emissões das atividades humanas de gases de efeito estufa (Willner *et al.*, 2018).

Quadro 2.11 - Aumento da temperatura global entre 1850 e 2020. Temperaturas observadas (linha preta) e simuladas (castanho e azul) (IPCC, 2021).



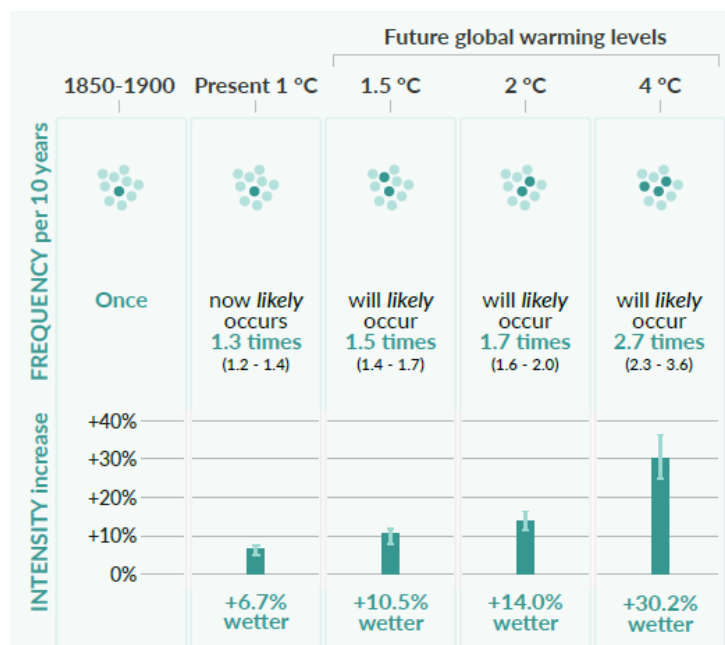
## 2.9.2. Precipitação intensa

A frequência e a intensidade dos eventos de forte precipitação aumentaram desde 1950 ao longo da maioria área da Terra, sendo a mudança climática provavelmente o principal fator.

O aumento da temperatura global faz com que a pressão atmosférica diminua, aumentando a circulação e humidade local, gerando a precipitação. As alterações climáticas são analisadas globalmente. Porém, cada região é afetada de formas diferentes, onde é húmido ficará mais húmido, e onde é seco, ficará mais seco (IPCC, 2021).

A amplitude anual de precipitação em médias globais, que é a diferença entre a precipitação máxima e mínima dentro de um ano, tende a aumentar à medida que o globo aquece (Chou & Lan, 2012). É muito provável que eventos de forte precipitação se intensifiquem e se tornem mais frequente, enquanto os eventos extremos diários de precipitação são projetados a ser intensificados em cerca de 7% para cada 1 °C de aquecimento global, conforme verifica-se no Quadro 2.12.

Quadro 2.12 – Aumento da chuva com frequência de 10 anos, em relação ao aumento da temperatura global. Comparação ao momento atual, e outros possíveis três cenários de aumento da temperatura: 1.5° C, 2° C, 4° C. (IPCC, 2021).



## 2.10. Impacto Estrutural

O comportamento das construções que são afetadas pela inundação pode ser considerado como um tema multidisciplinar, entre a mecânica estrutural e a de fluidos. Essas disciplinas juntas são capazes de simular o movimento da água e o efeito das ações de inundação (Lonetti & Maletta, 2018).

A água de uma inundação ou cheia tem a capacidade de causar danos a população (*e.g.*, materiais, econômicos, emocionais) e também ao patrimônio construído (*e.g.*, tombamento, destruição, rachaduras, humidades). Esta dissertação será focada no estudo relacionado com a quantificação financeira do impacto estrutural e não estrutural do patrimônio construído (*e.g.*, edifícios, vias de comunicação). Vale salientar que o patrimônio construído também afeta a população, pois a construção pode ter a finalidade de residência ou de serviço (*e.g.*, escolas, hospitais).

Os danos causados pela água de inundação podem ser diretos ou indiretos. Os danos indiretos abrangem a interrupção de comércios, dias perdidos no trabalho e aumento nos gastos. Os danos diretos incluem reações físicas, químicas, biológicas e outros impactos que uma inundação pode realizar diretamente numa construção, coletivamente, eles são denominados “ações”(Kelman & Spence, 2004).

Na Figura 2.22 apresenta alguns exemplos de construções que sofreram as ações causadas por inundações.



Figura 2.22 – Imagem A - destruição parcial de uma casa devido ao enfraquecimento da fundação numa inundação, Bohemia 1897 (Drdacky, 2010). Imagem B – Casa parcialmente destruída por um veículo que foi arrastado pelas águas de inundação, Petrópolis 2022 (CNN, 2022).

As principais ações são: hidrostática, hidrodinâmica, erosão, fluatibilidade, detrito e ações não físicos. No Quadro 2.13 apresenta-se em resumo, as características das ações mencionadas, as formas que se apresentam e suas consequências.

Quadro 2.13 - Ações e características da água de uma inundação em um patrimônio construído.

<b>Ações</b>	<b>Formas</b>	<b>Consequências</b>
<b>Hidrostática</b>	Pressão lateral	Deslocamento, rachaduras e deformação de elementos estruturais.
	Ascensão capilar	Elevação e flutuação de objetos, telhados e pisos.
<b>Hidrodinâmica</b>	Escoamento de baixa velocidade	Transporta objetos de um local para outro.
	Escoamento de alta velocidade	Causa grandes impactos, principalmente em pontes e margens de canais.
	Impacto dinâmico das ondas	Arrastar elementos de uma ponte ou destruí-la.
<b>Erosão</b>	Alteração nas condições do subsolo	Altera a tensão efetiva do solo, colapso da estrutura de contenção.
<b>Flutuabilidade</b>	Força de empuxo	Flutuação de partes ou do patrimônio por inteiro.
<b>Detritos</b>	Formação de barreiras	Acúmulo de objetos, troncos, materiais de construção, criando barreiras.
	Massa de gelo	Danificar um patrimônio devido à pressão ou inundação.
<b>Não físicos</b>	Química	Alteração de PH alterando as propriedades dos materiais.
	Biológica	Faz com que os materiais fiquem mais susceptíveis a proliferação de infecções biológicas, sendo agravado em caso de água contaminada.

Como mencionado, a ação da água numa inundação pode obter várias formas e conseqüentemente gerar danos numa construção. De acordo com Drdacky (2010) e Kelman & Spence (2004), as formas das ações mencionadas possuem as seguintes características e conseqüências:

- Pressão lateral: cria cargas proporcionais à altura da água e pode destruir as aberturas do patrimônio (portas e janelas). No entanto este tipo de pressão também pode ser perigoso para paredes independentes, como os muros de suporte. Além disso, esta força pode gerar deformação excessiva, deslocamento de elementos estruturais e rachaduras. Na Figura 2.23 tem-se a ação da pressão (hidrostática) numa parede e na Figura 2.24 tem-se uma parede que foi destruída por uma inundação.

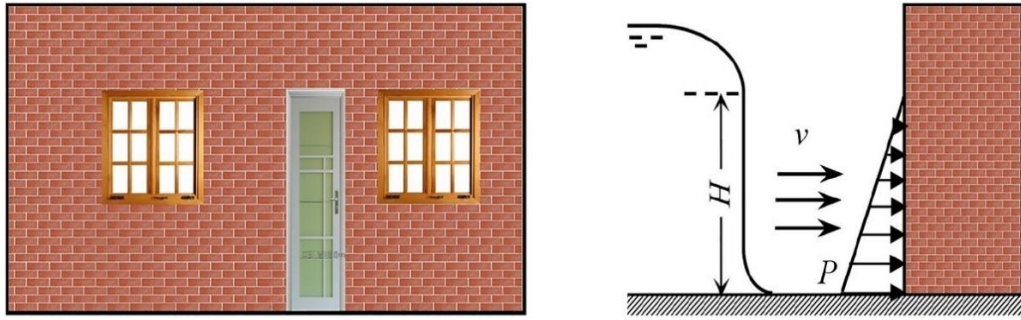


Figura 2.23 – Ação do impacto da inundação numa construção. Uma onda de inundação com altura  $H$  e velocidade  $v$  impacta a construção ao atingir a superfície da alvenaria. A pressão de impacto diminui linearmente com a distância da parte inferior do edifício. A distribuição da pressão de impacto na superfície do edifício deve ser afetada pela porta, pela janela e pelas condições de contorno (Xiao *et al.*, 2021).



Figura 2.24 - Parede de uma residência destruída após inundação, Alemanha 2021 (Euronews, 2021).

- Pressão hidrostática ascendente: esta ação é especialmente perigosa para áreas urbanas, pois pode elevar objetos e fazê-los flutuar, podendo criar barreiras nas áreas internas ou externas da construção. Esta pressão também pode elevar pisos, telhados e objetos inteiros, o que pode diminuir a estabilidade da estrutura e aumentar a probabilidade de tombamento. A Figura 2.25 mostra um telhado que flutuou e foi transportado para longe da estrutura que estava cobrindo.



Figura 2.25 - Telhado de um pavilhão que flutuou para uma distância longa da sua origem devido à inundação (Drdacky, 2010).

- A o de escoamento com baixa velocidade: este tipo de a o ocorre principalmente dentro do patrim nio construído, onde os objetos são levados de um ambiente para o outro, através da a o do escoamento. Na Figura 2.26   possível ver objetos dentro de uma casa totalmente inundada, e com os objetos da cozinha fora do local habitual.



Figura 2.26 – Objetos desequilibrados e empilhados após uma inunda o, Minas Gerais, 2020 (Globo, 2020b)

- A o de escoamento com alta velocidade: sem considerar o volume de água transportado, a alta velocidade do escoamento num canal de água pode impactar de forma severa uma estrutura. Este tipo de a o afeta principalmente a margem do canal que o transporta e   responsável pela maioria dos danos graves causados em pontes e barragens. A Figura 2.27 apresenta margens de um rio e uma ponte rodoviária afetadas pela a o de uma inunda o.



Figura 2.27 – Ponte rodoviária e margens de um rio danificadas após inundações, Alemanha 2021 (Carrington, 2021).

- Impacto dinâmico das ondas: este tipo de fenômeno é característico de tempestades marítimas ou cheias repentinas em rios e podem destruir ou deslocar estruturas e objetos inteiros (*e.g.*, pequenas construções e pontes). Uma representação desta ação pode ser vista na Figura 2.28, onde partes da estrutura da ponte foram danificadas e lançadas no rio.



Figura 2.28 – Estrutura de ponte romana afetada por inundações, Tavira 1989 (RTP, 1989).

- Mudanças nas condições do subsolo: a inundações gera grandes alterações no subsolo de uma estrutura que se alteram devido a saturação do solo. Tal leva a diversos problemas, entre eles: mudança na tensão efetiva, colapso da estrutura de contenção, elevação da estrutura devido à expansão do solo, solos expansivos, deslizamento de terra, erosão, mudança no nível da toalha freática, deterioração da fundação de

madeira e recalques adicionais. Na Figura 2.29 é possível ver além de ruas cobertas de água, o deslizamento de terra.



Figura 2.29 – Deslizamento de terra devido a uma inundação, Erfstadt-Blessem 2021 (BBC, 2021).

- Saturação de materiais com água: a imersão total em água e a saturação de materiais pode causar grande variedade de danos. Além do solo, materiais como argila, adobe e madeira em decomposição são materiais que podem entrar em colapso devido a saturação. Os tijolos queimados perdem a capacidade de carga e diminui sua resistência, podendo levar a estrutura ao colapso. O teto ou a camada de isolamento térmico totalmente saturado, pela água ou por lama, pode aumentar o peso do piso e resultar na destruição do mesmo. A Figura 2.30 mostra um exemplo de uma cobertura de madeira saturada e danificada após uma inundação.



Figura 2.30 - Vigas do piso de madeira deteriorada de uma casa que ficou totalmente imersa na água durante a inundação, Praga 2002 (Drdacky 2010).

- Contaminação de materiais com produtos químicos e poluição biológica: a água pode transportar várias substâncias químicas e microrganismos que podem causar deterioração química ou biológica numa construção. A alteração de PH influencia diversos materiais, como: os frescos são sensíveis ao PH e facilmente dissolvidos em ambiente alcalino; pormenores arquitetônicos de gesso de sulfato são sensíveis até mesmo à água pura. Contaminação com sais solúveis com subsequente eflorescência pode levar ao aumento da sujidade. Os materiais molhados ficam mais susceptíveis a colonização por infecções biológicas, que podem ser intensificados com a água contaminada. A Figura 2.31 apresenta uma parede que foi danificada pela ação química após contato com a água de inundação



Figura 2.31 - Dano devido a ação química após edifício ser inundado, Keighley 2000 (Kelman & Spence, 2004).

- Formação de Barreiras: as forças de elevação em combinação com o escoamento podem acumular objetos, troncos de madeira, blocos de gelo, materiais de construção e criar barreiras nas margens dos rios, dentro de edifícios e em ruas, na Figura 2.32 é possível ver um exemplo de barreira.



Figura 2.32 - Via interrompida devido acúmulo de objetos arrastados pela inundação, Schuld 2021 (Metsul, 2021).

- Deslocamento de massa de gelo: as inundações no período de inverno podem estar acompanhadas de massa de gelo, que podem danificar uma construção devido à alta pressão e a inundação. A Figura 2.33 mostra um exemplo de uma massa de gelo e uma inundação atingindo uma residência.



Figura 2.33 – Residência inundada e com blocos de gelos em seu entorno, Michigan 2008 (Press, 2008).

- Período após inundação: este intervalo de tempo é muito crítico, pois muitos danos aparecem após o nível da água diminuir (*e.g.*, ataque biológico, rede de drenagem rompida, intervenções corretivas inadequadas, mudança volumétrica durante os efeitos de secagem, perda de coesão). A Figura 2.34 mostra tampas de poços de visita fora do local, passeio danificado, água na via pública, além de duas pessoas com dificuldade em circular no passeio.



Figura 2.34 - Sistema de drenagem rompido e passeio danificado após uma inundação, Algarve 2020 (Lusa, 2020).

Jonov *et al.*, (2013), citando Penning-Rowell; Chatterton (1977), diz que os materiais de construção quando submersos em água de uma inundação, podem deteriorar,

expandir ou empenar. E ainda descreve algumas patologias nos materiais afetados pela água de inundação:

- «A alvenaria porosa pode absorver até 55 litros de água por metro quadrado. Apenas em caso de a inundação ser acompanhada de geada, ocorre danos, e a alvenaria em contato com a água poderá trincar e deixando os reparos mais onerosos;
- Os efeitos da inundação em rebocos internos de paredes de tijolos ou blocos, varia conforme a qualidade do reboco e do tempo de duração da inundação. Se as condições do reboco (*e.g.*, forte aderência do reboco à base e ausência de trincas) forem adequadas e o período de imersão for curto (minutos), não ocorre danos graves. Uma argamassa de qualidade deve possuir melhores características impermeáveis e então resistir à água por período mais longo. Porém se o tempo de imersão for excessivamente prolongado, diminuirá a aderência da argamassa a base, necessitando de reparo;
- Se a inundação for de duração curta (horas) pode causar entre 10 % a 50 % menos danos do que inundações de duração longa (dias), uma vez que a água não tem tempo de penetrar o reboco e os tijolos. Inundações de longa duração causam o esfacelamento do rejunte, principalmente em prédios antigos, onde ele é à base de cal;
- Independente do tempo de duração da inundação, a pintura das paredes exteriores sofre danos. A água penetra na tinta, causando a perda da cor e esfacelamento ao secar.»

Elmer *et al.*, (2010) menciona que o impacto de uma inundação varia conforme seu tempo de retorno e intensidade. As inundações de alta probabilidade e baixa intensidade, afetam principalmente os patrimônios cujos habitantes já sofreram inundações ou possuem informações de como diminuir os danos. Desta forma há maior precaução e conseqüentemente os danos são menores. A Figura 2.35 exemplifica:

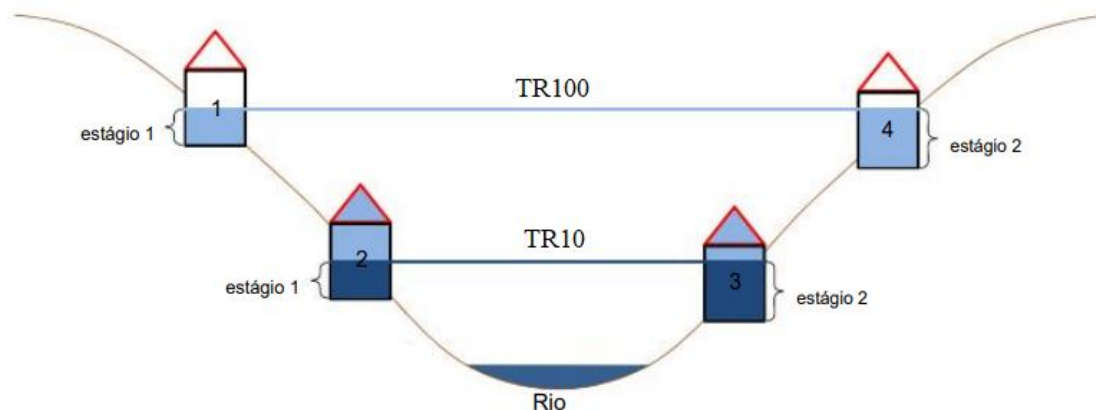


Figura 2.35 - A inundação em um rio com período de retorno a cada dez anos (TR10), afetando os Edifícios 2 e 3 (azul escuro). Devido à exposição dos edifícios, a profundidade de inundação varia para cada edifício (estágio), portanto, esperamos uma taxa de perda maior para o Edifício 3 do que para o Edifício 2. Para uma inundação com período de retorno de 100 anos (TR100), as perdas acumuladas são maiores à medida que mais objetos (neste exemplo) todos os quatro edifícios são afetados (azul claro) (Elmer *et al.*, 2010).

A severidade de dano é determinada pela combinação do impacto e da resistência. Em geral, a estimativa de danos diretos por inundação em construções, ocorre em duas etapas. Na primeira é realizada a análise dos danos causados pelo efeito das ações de inundação considerando a resistência das construções. Na segunda etapa, converte-se os danos estruturais em estimativa econômica. (Pistrika *et al.*, 2014).

### 2.10.1. Avaliação de impacto

Os danos causados pelas inundações são responsáveis por aproximadamente um terço das perdas econômicas ocorridas como resultado de desastres naturais na Europa. Considerando a saúde e a vida humanas, o ambiente, o património cultural, as atividades económicas e as infraestruturas, é desejável e possível reduzir as consequências das inundações. Aos poucos, as nações europeias estão alterando a sua abordagem nas interações entre os fatores hidrológicos e socioeconômicos na gestão de riscos de inundação (Albano *et al.*, 2018; Garrote *et al.*, 2016; Directiva 2007 60/CE).

De acordo com Merz *et al.*, (2004), os projetos tradicionais de inundações estão sendo gradativamente complementados ou substituídos por métodos visando a análise de risco e a estimativa dos impactos das inundações. A Diretiva n.º 2007/60/CE define risco de inundação como sendo “a combinação da probabilidade de inundações e das suas potenciais consequências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as atividades económicas”. As avaliações de impacto de inundações,

normalmente são limitadas a impactos prejudiciais, embora possam haver consequências positivas, *e.g.*, o reabastecimento de águas subterrâneas ou a manutenção de alta diversidade biológica em várzeas devido a inundações.

Os danos causados por inundações podem ser classificados numa primeira etapa entre tangíveis e intangíveis, e posteriormente tem-se classificação entre danos diretos e indiretos. É considerado tangível os danos que podem ser calculados monetariamente e intangível os que não podem. Os danos diretos ocorrem quando a água de inundação entra em contato com humanos, propriedades ou meio ambiente. Os indiretos ocorrem em decorrência dos impactos dos danos diretos (Velasco *et al.*, 2016).

No Quadro 2.14 é possível verificar a forma de medição dos danos conforme mencionado.

Quadro 2.14 - Categorias de danos causados por inundações ( Machado *et al.*, 2005).

Setor	Danos Tangíveis		Danos Intangíveis	
	Diretos	Indiretos	Diretos	Indiretos
Habitacional	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo	Custos de limpeza, alojamento, medicamentos	Perdas de vidas humanas	Estados psicológicos de estresse e ansiedade; danos de longo prazo à saúde
Comércio e serviços	Danos físicos à construção, estrutura e a seu conteúdo Perdas ou danos a estoques	Custos de limpeza Lucros cessantes Desemprego Perda de base de dados	Perdas de vidas humanas	Estados psicológicos de estresse, ansiedade e falta de motivação; danos de longo prazo à saúde
Industrial	Danos físicos à construção, estrutura, e a seu conteúdo Perdas ou danos a estoques de matéria prima e produtos acabados	Custos de limpeza Lucros cessantes Desemprego Perda de base de dados	Perdas de vidas humanas	Estados psicológicos de estresse, ansiedade e falta de motivação; danos de longo prazo à saúde
Equipamentos públicos e serviços	Danos físicos à construção, estrutura e seu conteúdo	Custos de limpeza e de interrupção de serviços Custo dos serviços de emergência	Perdas de vidas humanas	Estados psicológicos de estresse, ansiedade e falta de motivação; danos de longo prazo à saúde Inconvenientes de interrupção de serviços
Infra-estrutura	Danos físicos ao patrimônio	Custos de limpeza e de interrupção de serviços	Perdas de vidas humanas	Inconvenientes de interrupção de serviços
Patrimônio histórico e cultural	Danos físicos ao patrimônio	Custos de limpeza e de interrupção de serviços	Perdas de vidas humanas	Inconvenientes de interrupção de serviços

O método mais comum e internacionalmente aceito de avaliar danos em construções devido às inundações é através da aplicação de uma curva de profundidade-dano, DDC

(do inglês *Depth–Damage Curve*). «Uma DDC relaciona o dano percentual ou perda econômica estimada à integridade estrutural e/ou conteúdo de um edifício diretamente a relacionada à altura que a água de inundação atingiu» (McGrath *et al.*, 2019). Merz *et al.*, (2004), mencionam que a maioria das curvas profundidade-dano apenas considerada a profundidade da inundação, porém, outros fatores influenciam as perdas econômicas causadas por inundação: como a velocidade do escoamento, duração da inundação, disponibilidade / informação de alerta da inundação e a qualidade da resposta externa.

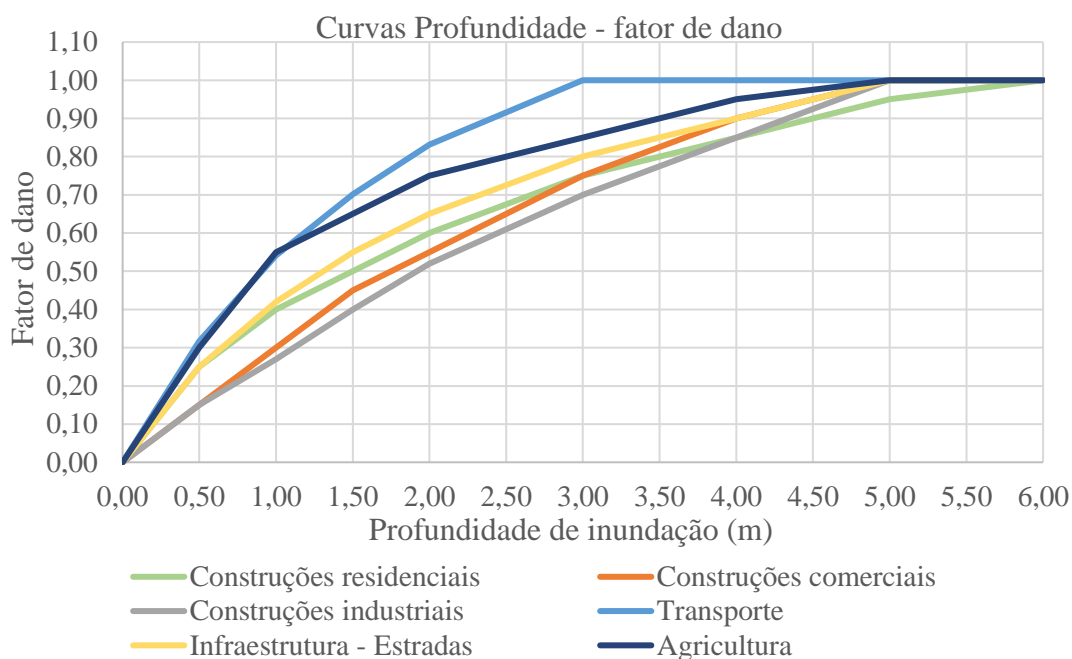
Para obter os valores dos danos equivalente a Portugal, utilizou-se a publicação Huizinga *et al.*, (2017), que fornece um ficheiro com os valores, considerações e guia para obter os danos em 214 países. As funções de profundidade-dano são apresentadas para as seguintes categorias de patrimônios construídos: construções residenciais e comerciais, indústrias, transporte (veículos), infraestrutura (estradas) e agricultura.

A partir destas categorias, existem valores que podem ser em €/m<sup>2</sup> ou €/ha<sup>2</sup>, que estimam o valor que uma área afetada terá em danos, conforme indicado no Quadro 2.15. Estes valores de danos vão variar conforme a profundidade da inundação, e para ajustar essa variação utiliza-se alguns fatores, Quadro 2.16, que ao serem multiplicados corrigem o valor do dano conforme a profundidade de inundação, Quadro 2.17.

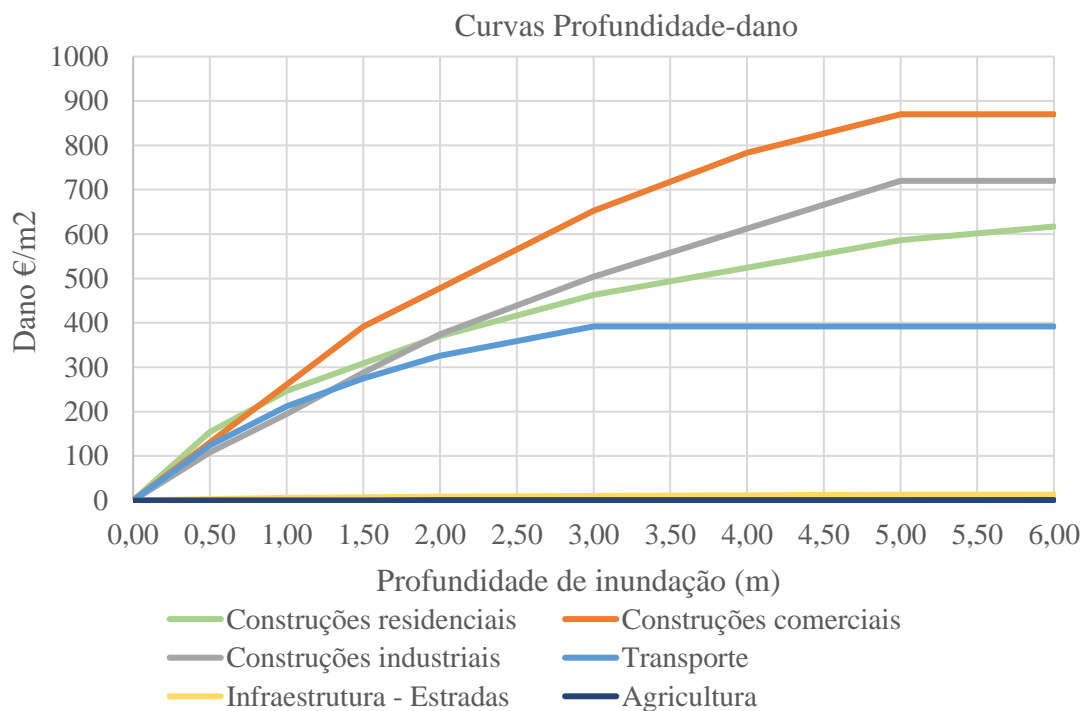
Quadro 2.15 – Danos monetários conforme o patrimônio em Portugal (Huizinga *et al.*, 2017).

	<b>Dano estrutural (€/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Dano não estrutural (€/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Total (€/m<sup>2</sup>)</b>
Residencial	411	205	617
Comercial	435	435	870
Industrial	288	432	720
Transporte	-	-	392
Infraestrutura	-	-	13
Agricultura	-	-	0,10

Quadro 2.16 - Fator de dano-profundidade da água de inundação, conforme o tipo de patrimônio construído em Portugal (Huizinga *et al.*, 2017).



Quadro 2.17 - Curva Profundidade-dano total de acordo com o patrimônio construído em Portugal (Huizinga *et al.*, 2017).



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição do caso de estudo

O caso de estudo corresponde à Freguesia de Cabanas de Tavira localizada na área do Parque Natural da Ria Formosa, pertencente ao município de Tavira, no distrito de Faro, região do Algarve, Portugal. Foi escolhida por sofrer recorrentemente cheias, normalmente associadas a precipitações intensas de curta duração com ocorrência simultânea de marés elevadas. A Figura 3.1 ilustra a localização desta região.



Figura 3.1 – Localização de Cabanas de Tavira no sistema de coordenadas EPSG:3763-TRS89.

A freguesia de Cabanas surgiu em 20 de junho de 1997, quando foi separada da freguesia vizinha Conceição. A região possui cerca 4,8 km<sup>2</sup> de área e por ela passa uma via ferroviária e a Estrada Nacional 125 - EN125. A economia de Cabanas de Tavira tinha como base as artes piscatórias, mas em 1973 surgiu o primeiro empreendimento turístico de Cabanas, Pedras da Rainha, começando e permanecendo até hoje, como fonte econômica alternativa.

Segundo o Censo, (INE, 2021), a contabilização da população da região de Cabanas de Tavira foi somada à freguesia vizinha Conceição, sendo que juntas tiveram

aumento populacional de 36,2%, em relação ao Censo 2011. Em 2011 as freguesias de Cabanas de Tavira e Conceição, possuíam 2.519 habitantes. Em 2021 a população aumentou para 3.431, número que aumenta na época turística. Em 2019 (pré-pandemia Covid-19), a região do Algarve recebeu 5,08 milhões de hóspedes, sendo 2,1 milhões apenas de julho a setembro (Turismo de Portugal, 2019). No ano de 2020 (durante pandemia Covid-19), o número total de hóspedes na região do Algarve foi de 2 milhões.

Na Figura 3.2 é possível ver a o aumento de construções em Cabanas de Tavira entre os anos de 1991 e 2021.



Figura 3.2 – Fotografia aérea de Cabanas de Tavira em 1991 (A) e em 2021 (B). (Imagem A - Isidoro, 2012); (imagem B - Google Maps, 2021).

### 3.2. Caracterização da bacia hidrográfica

Para delimitar a área de estudo necessitou-se obter alguns dados sobre a região que serviram como base para compreender o funcionamento hidrológico e as características do local.

#### 3.2.1. Topografia e bacias

Inicialmente analisou-se a topografia da região, seus aclives e declives, para realizar a delimitação das bacias de estudo e suas linhas d'águas. Para este trabalho utilizou-se o QGIS, que é um Sistema de Informação Geográfica (SIG), *software* gratuito, com amplas funções de análise espacial.

Dentro da região de Cabanas de Tavira existem duas linhas d'águas definidas pelas cartas militares portuguesas (2005), denominadas Ribeira da Canada (1) e Ribeira do Pocinho (2). A partir destas linhas d'águas obteve-se duas bacias, como ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Ribeira da Canada (1) e Ribeira do Pocinho (2) e suas linhas d'águas (linha azul). As fozes de ambas estão nomeadas como A, B. A região representada por linhas inclinadas laranja tem seu deságue direto na Ria formosa, através de dispositivos de drenagem. A linha vermelha representa a divisão entre as sub-bacias.

A bacia hidrográfica da Ribeira da Canada possui uma área de cerca de 3,8 km<sup>2</sup> e extensão de linha d'água principal de 10,9 km, com inclinação média de 1,0 %. A bacia correspondente à Ribeira do Pocinho possui área de 1,1 km<sup>2</sup>, linha d'água principal com 1,5 km, e inclinação média de 1,5% (Jorge M.G.P. Isidoro *et al.*, 2010).

As duas linhas d'águas desaguam na Ria formosa, Figuras 3.4 e 3.5.



Figura 3.4 - Fotografia da foz da Ribeira da Canada.



Figura 3.5 – Fotografia da foz da Ribeira do Pocinho.

Na figura 3.6 tem-se a topografia utilizada para realizar a delimitação das duas bacias.

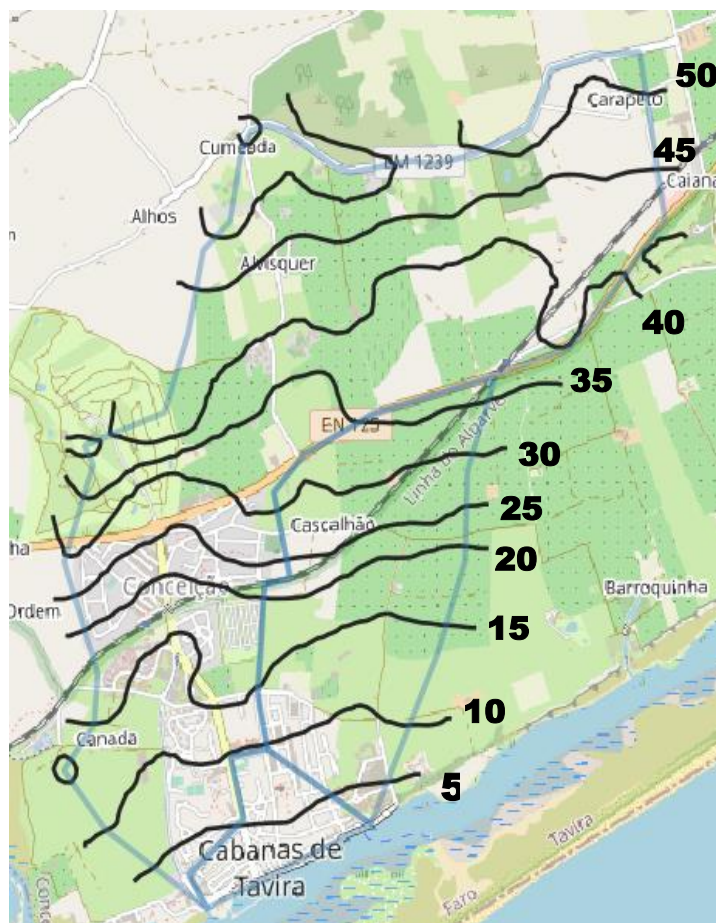


Figura 3.6 - Topografia das bacias de estudo com curvas de nível de equidistância 5m.

### 3.3. Definição da chuvada de projeto

A chuvada de projeto definiu-se com base nas curvas de probabilidade udométrica que constam no Decreto Regulamentar 23/95 de 23 de agosto (Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais), sendo o hietograma a distribuição da chuva ao longo da duração do evento crítico, estimada através do Método dos Blocos Alternados (Chow, 1988), para o período de retorno ( $T_r$ ) em análise (100 anos).

#### 3.3.1. Estimativa do tempo de concentração

Em virtude da pequena dimensão das bacias hidrográficas, considerou-se que a chuvada de projeto ocorre sobre a totalidade da área das mesmas, isto é, que toda a área das bacias hidrográficas estão a contribuir para o escoamento na secção de referência.

O tempo de concentração ( $T_c$ ) para a bacia hidrográfica na secção de referência foi estimado de acordo com a fórmula de Kirpich. Assim:

$$T_c = 0,0663 \cdot \frac{L^{1.155}}{\Delta h^{0.385}} = 0,0663 \frac{3.62^{1.155}}{0.039^{0.385}} = 1,0 \text{ h}$$

Sendo:

$T_c$  - Tempo de concentração (horas);

$L$  - Comprimento da linha de água principal (km);

$\Delta h$  - Diferença de cotas entre as extremidades da linha de água principal (km).

O tempo de concentração estimado para a bacia hidrográfica é assim de 1,0 hora, ou seja, de 60 minutos.

### 3.3.2. Definição dos hietogramas

De acordo com o Decreto Regulamentar acima referido, para a região pluviométrica A e considerando uma duração de precipitação igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica, o que é perfeitamente admissível pois as bacias hidrográficas são pequenas e, assim, é natural que as bacias como um todo estejam simultaneamente a contribuir para o escoamento na secção de referência, as intensidades de precipitação são:

- Para um período de retorno de 100 anos.

$$I = 365.62 \cdot t^{-0.508} = 365.62 \cdot 60^{-0.508} = 46 \text{ mm/h}$$

Onde:

$I$  = Intensidade de precipitação (mm/h);

$t$  = Duração da chuvada (min)

O Quadro 3.1, apresenta os cálculos associados ao estabelecimento do hietograma da precipitação para período de retorno de 100 anos. A duração de cada bloco de precipitação é de 12 minutos.

Quadro 3.1 - Cálculo hietograma para TR 100 anos

Duração	Intensidade	Precipitação		Bloco Temporal	Precipitação hietograma
		Acumulada	Incremento		
min.	mm/h	mm	mm	min.	mm
12	103,5	20,7	20,7	0-12	4,8
24	72,8	29,1	8,4	12-24	6,4
36	59,2	35,5	6,4	24-36	20,7
48	51,2	40,9	5,4	36-48	8,4
60	45,7	45,7	4,8	48-60	5,4

### 3.4. Caracterização do solo

#### 3.4.1. Uso e ocupação

O uso e ocupação do solo nas duas bacias hidrográficas foram classificadas com base na carta CORINE Land Cover (2018). Os usos mais predominantes na bacia são: culturas temporárias (50,8%), pomares (21,8%) e tecido urbano descontínuo (15,6%), conforme ilustrado na Figura 3.7 e no Quadro 3.2.

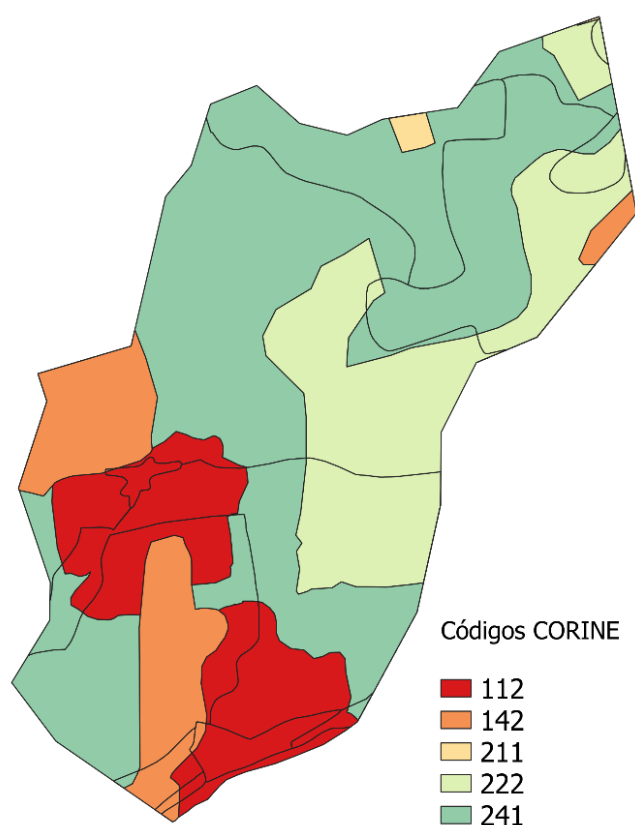


Figura 3.7 - Uso e ocupação do solo na bacia

Quadro 3.2 - Identificação código CORINE e ocupação na bacia.

Código CORINE	Definição	Ocupação
112	Tecido urbano descontínuo	15,6%
142	Equipamentos desportivos, culturais e de lazer e zonas históricas	11,4%
211	Culturas temporárias de sequeiro	0,5%
222	Pomares	21,8%
241	Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes	50,8%

No Quadro 3.3 tem-se os coeficientes de Número de Manning relacionados aos códigos CORINE.

Quadro 3.3 – Associação de valores de Número de Manning com classificação CORINE (Papaioannou *et al.*, 2018).

LABEL1	LABEL2	LABEL3	Mannings n
1 Artificial surfaces	1.1 Urban fabric	1.1.1 Continuous urban fabric	0.013
		1.1.2 Discontinuous urban fabric	
	1.2 Industrial, commercial and transport units	1.2.1 Industrial or commercial units	0.013
		1.2.2 Road and rail networks and associated land	
1.2.3 Port areas			
1.2.4 Airports			
1.3 Mine, dump and construction sites	1.3.1 Mineral extraction sites	0.013	
	1.3.2 Dump sites		
	1.3.3 Construction sites		
1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas	1.4.1 Green urban areas	0.025	
	1.4.2 Sport and leisure facilities		
2 Agricultural areas	2.1 Arable land	2.1.1 Non-irrigated arable land	0.03
		2.1.2 Permanently irrigated land	
		2.1.3 Rice fields	
	2.2 Permanent crops	2.2.1 Vineyards	0.08
		2.2.2 Fruit trees and berry plantations	
		2.2.3 Olive groves	
	2.3 Pastures	2.3.1 Pastures	0.035
	2.4 Heterogeneous agricultural areas	2.4.1 Annual crops associated with permanent crops	0.04
		2.4.2 Complex cultivation patterns	0.04
		2.4.3 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	0.05
2.4.4 Agro-forestry areas		0.06	
3 Forest and semi natural areas	3.1 Forests	3.1.1 Broad-leaved forest	0.1
		3.1.2 Coniferous forest	
		3.1.3 Mixed forest	
	3.2 Scrub and/or herbaceous vegetation associations	3.2.1 Natural grasslands	0.04
		3.2.2 Moors and heathland	0.05
		3.2.3 Sclerophyllous vegetation	0.05
		3.2.4 Transitional woodland-shrub	0.06
	3.3 Open spaces with little or no vegetation	3.3.1 Beaches, dunes, sands	0.025
		3.3.2 Bare rocks	0.035
		3.3.3 Sparsely vegetated areas	0.027
		3.3.4 Burnt areas	0.025
3.3.5 Glaciers and perpetual snow		0.01	
4 Wetlands	4.1 Inland wetlands	4.1.1 Inland marshes	0.04
		4.1.2 Peat bogs	
	4.2 Maritime wetlands	4.2.1 Salt marshes	0.04
4.2.2 Salines			
4.2.3 Intertidal flats			
5 Water bodies	5.1 Inland waters	5.1.1 Water courses	0.05
		5.1.2 Water bodies	
	5.2 Marine waters	5.2.1 Coastal lagoons	0.07
5.2.2 Estuaries			
5.2.3 Sea and ocean			

### 3.4.2. Tipos de solo

Os tipos de solo nas duas bacias em estudo foram classificados a partir da carta de solos de Portugal, de acordo com as classes taxonômicas classificadas pelo Serviço de Reconhecimento e de Ordenamento Agrário (SROA). Estes, foram reclassificados de acordo como Método da Curva-Número (SCS- *Soil Conservation Service*, 1972), que agrupa os solos em função das suas classes texturais. Na Figura 3.8, tem-se a classificação dos solos das bacias em estudo.

O valor da curva número (CN), também chamado de número de escoamento, resulta da análise dos solos e respetivos usos do solo, que em conjunto condicionam a relação entre a precipitação e precipitação efetiva (parcela da precipitação que contribui para o escoamento superficial). Os valores de CN são obtidos para cada uso e cobertura do solo em tabela padrão do SCS. As tabelas foram desenvolvidas a partir de testes realizados nas condições de uso e cobertura do solo dos EUA. A partir dos resultados obtidos os solos foram classificados em quatro grupos de solos: A, B, C, D (Lencastre, 1992; Araújo Neto *et al.*, 2012).

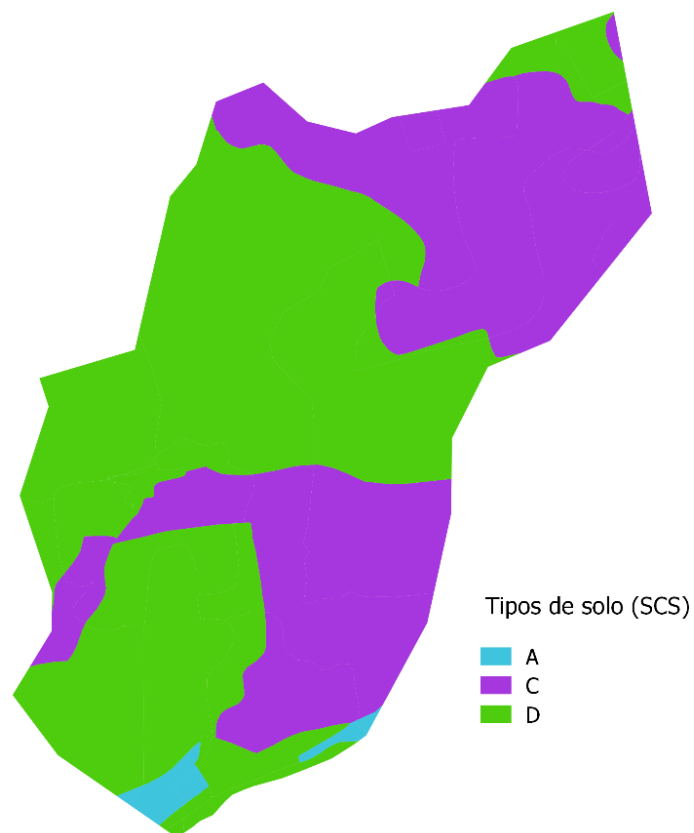


Figura 3.8- Tipos de solo das duas bacias a partir da classificação SCS.

### 3.4.3. Estimativa do número de escoamento

Para a classificação do número de escoamento (CN) foi intersectada a informação relativa ao tipo de solo com a do uso do solo, obtendo-se os valores de CN para condições antecedentes médias de humedecimento do solo (AMC II) (Chow, 1988), apresentados na Figura 3.9. Estes resultam da análise dos tipos de solo e respetivos usos, que em conjunto condicionam a relação entre a precipitação e a precipitação efetiva (a que provoca escoamento superficial). A condição AMC I representa a situação que o solo está seco; a condição AMC II representa condições intermédias, com humidades antecedentes de cheias de pequena dimensão.

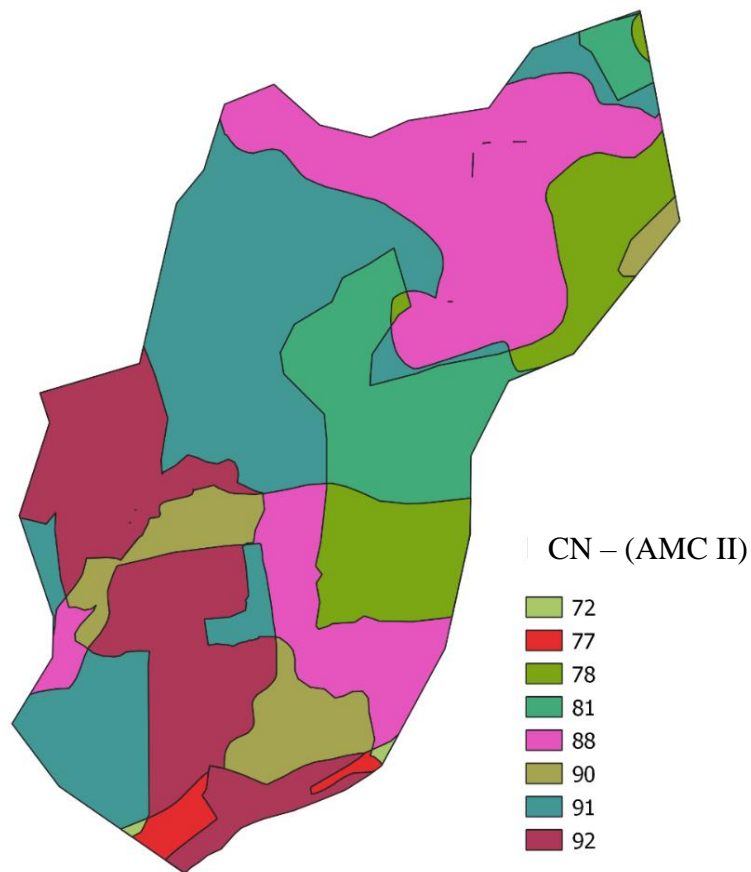


Figura 3.9 - Números de escoamento (AMC II) na bacia.

Em cenários de cheia, as condições antecedentes de teor de água no solo devem corresponder a solo muito encharcado, em condições de empocamento, situação propícia à formação das maiores cheias. Assim, os anteriores valores de CN para AMC II devem ser corrigidos para AMC III, Figura 3.10.

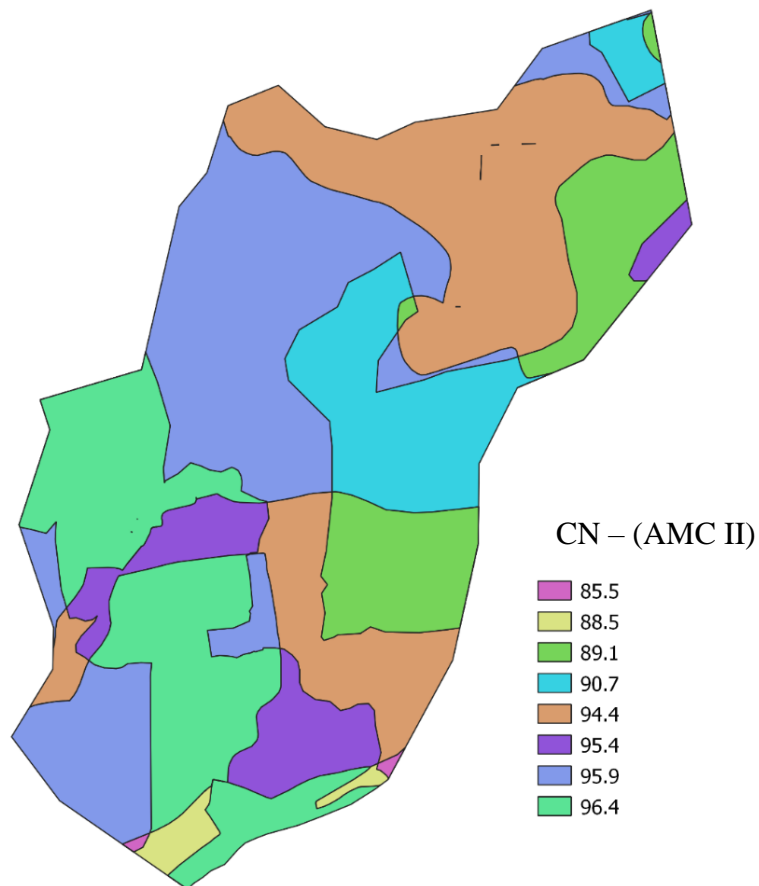


Figura 3.10 - Números de escoamento (AMC III) nas duas bacias.

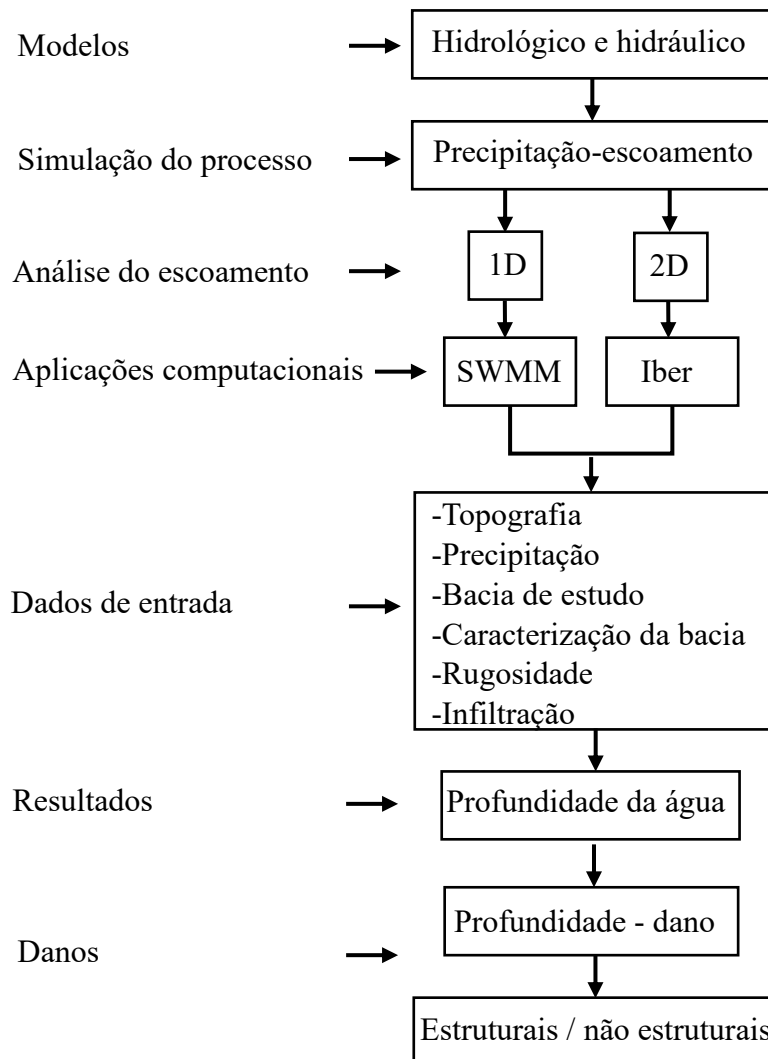
A ponderação pesada do número de escoamento (AMC III) face à área conjunta das duas bacias hidrográficas é de 94.2.

#### 4. MODELAÇÃO DE DRENAGEM SUPERFICIAL DO CASO DE ESTUDO

Para realizar o estudo dos danos estruturais e não estruturais decorrentes de uma inundação em Cabanas de Tavira, foram utilizadas duas aplicações computacionais para modelação hidrodinâmica: o SWMM para a modelação 1D e o Iber para a modelação 2D. No Quadro 4.1 tem-se esquematização do processo percorrido através da modelação para obter os danos.

Tendo em consideração as diferenças existentes nos dois tipos de modelação, alguns dados necessitaram ser analisados de formas distintas para melhor se adequar as aplicações computacionais. Assim, no Quadro 4.2, apresenta-se um resumo de algumas características das aplicações e também as medidas adotadas para atender ambas modelações.

Quadro 4.1 – Fluxograma com o processo percorrido através da modelação para se obter os danos nos patrimônios construídos.



Quadro 4.2 – Resumo do formato e dos dados inseridos conforme a aplicação.

<b>Modelos</b>	<b>SWMM</b>	<b>Iber</b>
<b>Característica da aplicação</b>	Unidimensional, concentrado.	Bidimensional, distribuído.
<b>Escoamento e topografia</b>	O escoamento segue dentro dos limites (simulando os lancis) pré-definidos para os troços. Obteve-se as cotas dos eixos das ruas e aplicou-se nos nós, fazendo com que a rua possuísse inclinação. Escoamento dominado pela inclinação e rugosidade.	Utilizou-se um ficheiro DTM com a topografia natural. O escoamento percorre a superfície e se espraia conforme a topografia natural permite. Não se considerou as elevações das construções, muros ou lancis de arruamento. Escoamento dominado pela topografia, rugosidade e advecção.
<b>Precipitação</b>	Hietograma com TR100 anos, considerando a mesma estação pluviométrica em todas as sub-bacias.	Hietograma com TR100 anos, aplicado em todas as células da malha.
<b>Sub-bacia</b>	Tendo em conta as diversas características do local e a possibilidade do SWMM, criaram-se várias sub-bacias de modo a separá-las conforme suas diferenças predominantes.	As bacias da Ribeira da Canada e do Pocinho foram analisadas conjuntamente, e quando necessário, as características foram atribuídas no local através da malha.
<b>Dados de entrada das sub-bacias</b>	Vários dados das sub-bacias foram obtidos de fontes externas e atribuída individualmente, <i>e.g.</i> , inclinação, área, largura, entre outros. E por ser um modelo concentrado, faz com que estas propriedades sejam constantes por toda a sub-bacia.	As características de cada célula são introduzidas individualmente. As células variam de 4 m <sup>2</sup> a 220 m <sup>2</sup> . No modelo distribuído, as características são consideradas variáveis no espaço.
<b>Características pontuais</b>	A Ribeira da Canada auxilia o escoamento da rua adjacente, então criou-se uma seção contemplando a rua e o canal da Ribeira para realizar o escoamento.	Nas duas bacias, utilizou-se a topografia natural, sem realizar nenhuma interferência ou ajuste.
<b>Rugosidade</b>	Atribuiu-se para os troços o Número de Manning conforme o tipo de revestimento das ruas e canal.	Atribuiu-se para a superfície o Número de Manning, conforme o uso do solo, célula a célula.
<b>Infiltração</b>	Utilizou-se o método Curva-número e atribuída conforme cada sub-bacia.	Utilizou-se o método Curva-número e foi atribuída abrangendo as bacias da Ribeira da Canada e do Pocinho.
<b>Resultados</b>	Fornece resultados ( <i>e.g.</i> , altura de água, velocidade, volume) nos nós e troços.	Fornece resultados sobre a superfície.

## **4.1. Aplicação computacional SWMM**

O SWMM (*Storm Water Management Model*) é um modelo dinâmico unidimensional de precipitação-escoamento que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas, podendo ser utilizado para a simulação de um único evento de precipitação, como também para uma simulação contínua de longo prazo. Esta aplicação computacional permite simular o comportamento hidrológico e hidráulico, estimar a qualidade da água, análise de práticas de controlo na origem (LID) e visualizar os resultados em diferentes formatos (EPA, 2015). A distribuição do SWMM é realizada de forma gratuita pela da EPA (*United States Environmental Protection Agency*), o seu desenvolvimento iniciou em 1972, e desde então, ocorreram várias atualizações. No estudo da presente dissertação utilizou-se a versão 5.1.015, disponibilizada a partir de julho de 2020.

Os modelos baseados no processo precipitação-escoamento (*e.g.*, SWMM e Iber) são importantes para o planeamento, projeto e gestão de sistemas de recursos hídricos. Estes modelos são utilizados numa ampla variedade de aplicações hidrológicas que vão desde a estimativa do escoamento da bacia, até a análise do impacto da mudança do uso do solo no escoamento (Hossain *et al.*, 2019). Devido a sua variedade de usos, diversos estudos foram realizados utilizando o SWMM e pode-se considera-lo como uma das aplicações computacionais mais utilizadas no mundo (Pachaly *et al.*, 2021).

Diversos dados de entrada devem ser inseridos para a realização da modelação, variando conforme o estudo que se deseja realizar. No caso do estudo hidrológico e hidráulicos, os principais dados de entrada são: características das sub-bacias (*e.g.*, taxa de impermeabilização, inclinação, comprimento), dados pluviométricos, cotas topográficas e processo de infiltração.

### **4.1.1. Divisão e objetos**

De acordo com EPA (2015), para realizar a modelação, o SWMM divide os elementos da drenagem urbana a partir de vários modelos ambientais, que incluem:

- Modelo atmosférico: Responsável pela geração da precipitação (chuva ou neve);
- Modelo de escoamento superficial: Recebe a precipitação. Uma vez na superfície, a precipitação pode evaporar para a atmosfera, infiltrar na subsuperfície ou escoar;

- Modelo de escoamento subsuperficial: recebe infiltração do modelo de escoamento superficial e transfere uma parte deste volume para o modelo de transporte;
- Modelo de transporte: Possui elementos (canais, tubos, troços, bombas e reguladores) e unidades de armazenamento / tratamento que transportam água para a(s) descarga(s) ou estações de tratamento.

Os dados de entrada no SWMM variam conforme o estudo que irá ser realizado. No Quadro 4.3 apresenta-se uma descrição das categorias de estudo compatíveis e utilizadas neste trabalho, além dos principais objetos (componentes dos sistemas).

Quadro 4.3 – Categoria de estudos e suas características no SWMM (EPA, 2015).

<b>Categoria</b>	<b>Tipo de objeto</b>	<b>Descrição</b>
<b>Hidrologia</b>	Pluviômetro	Fonte de dados de precipitação para uma ou mais sub-bacias.
	Sub-bacia	Uma parcela de terra que recebe precipitação, associada a um pluviômetro, e gera escoamento que flui para um nó do sistema de drenagem ou para outra sub-bacia.
<b>Hidráulica</b>	Junção	Um ponto no sistema de transporte onde os troços conectam-se uns aos outros com armazenamento de volume insignificante (por exemplo, bueiros, conexões de tubos, poços de visita).
	Divisor	Um ponto no sistema de transporte onde o fluxo de entrada se divide em dois condutos de saída de acordo com uma relação conhecida.
	Unidade de armazenamento	Uma lagoa, lago, represa ou câmara que fornece armazenamento de água.
	Conduta	Um canal, troço ou tubo que transporta água de um nó do sistema de transporte para outro.
	Bomba Regulador	Um dispositivo que eleva a carga hidráulica da água. Um açude, orifício ou saída usado para direcionar e regular
<b>Objeto de Dados</b>	Série Temporal	Uma função tabular que descreve como uma quantidade varia com o tempo (por exemplo, chuva, superfície do emissário elevação, etc.).
	Padrão de Tempo	Um conjunto de fatores que se repetem ao longo de um período de tempo (por exemplo, padrão horário diurno, padrão diário semanal, etc.).

Os principais objetos utilizados para modelar a drenagem urbana com o processo de precipitação-escoamento são os pluviômetros e as sub-bacias. O SWMM possibilita que sejam feitas diversas sub-bacias de modo a diferenciá-las de acordo com as características predominantes (*e.g.*, tipo de solo, declividade ou taxa de impermeabilização) deste modo, a transformação da precipitação para o escoamento superficial é calculada por sub-bacias, o que permite uma maior aproximação com a realidade. A geração de sub-bacias com base em suas características é muito importante, pois a precipitação tem comportamento diferente numa bacia onde o uso do solo é predominantemente rural, se comparada a uma bacia urbanizada. Numa bacia rural a taxa de infiltração tende a ser maior, enquanto numa bacia urbanizada existem obstáculos, maiores taxas de impermeabilização e um sistema artificial de drenagem. Na Figura 4.1, tem-se a demonstração de alguns objetos disponíveis no SWMM.

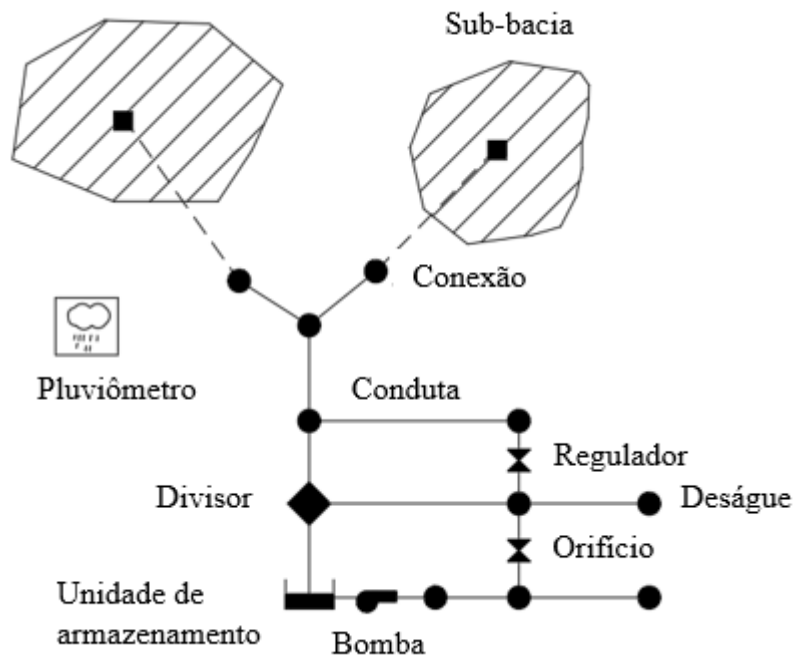


Figura 4.1 – Demonstração de alguns objetos disponíveis para modelação no SWMM. Nesta dissertação serão utilizados somente os objetos referentes ao escoamento superficial (EPA, 2015).

A sub-bacia é conceitualizada no SWMM como uma superfície retangular que tem uma inclinação uniforme, e uma largura  $W$ , que drena para um único canal de saída, conforme representado na Figura 4.2. Assume-se que o escoamento na superfície da sub-bacia, se comporta como se fosse um escoamento uniforme dentro de um canal retangular (EPA,2015).

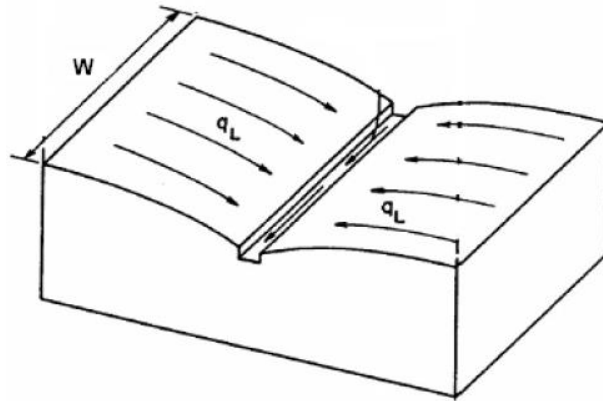


Figura 4.2 - Conceito de sub-bacia no SWMM (EPA, 2015)

A sub-bacia é modelada como um reservatório não linear, que após receber a precipitação e ocorrer a evaporação, uma parcela da água infiltra no solo ( $ds$ ) e outra permanece sobre a superfície, gerando o escoamento superficial ( $q$ ), conforme ilustrado na Figura 4.3.

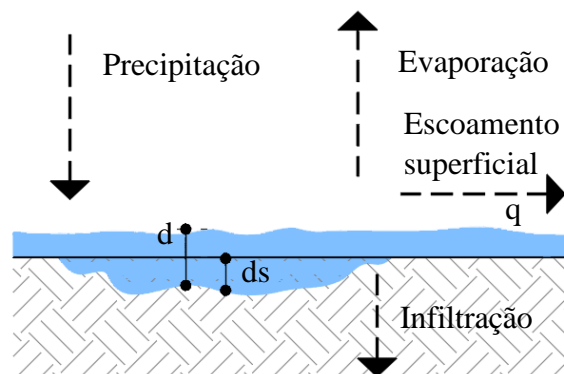


Figura 4.3 - Esquematização simplificada do processo de precipitação-escoamento.

#### 4.1.2. Processamento

A partir dos objetos mencionados anteriormente, o SWMM consegue simular vários fenômenos hidrológicos, como a precipitação, o degelo, a evaporação e a infiltração.

Os processos hidráulicos correm no compartimento de transporte (*e.g.*, canal, tubo, troço), que conduzem o volume proveniente do escoamento e de entradas externas. Neste processamento é possível realizar a simulação de bombas, modelar regimes como o remanso, alagamento, entre outros.

A Figura 4.4 representa as etapas do processamento e como estes processos estão interligados.

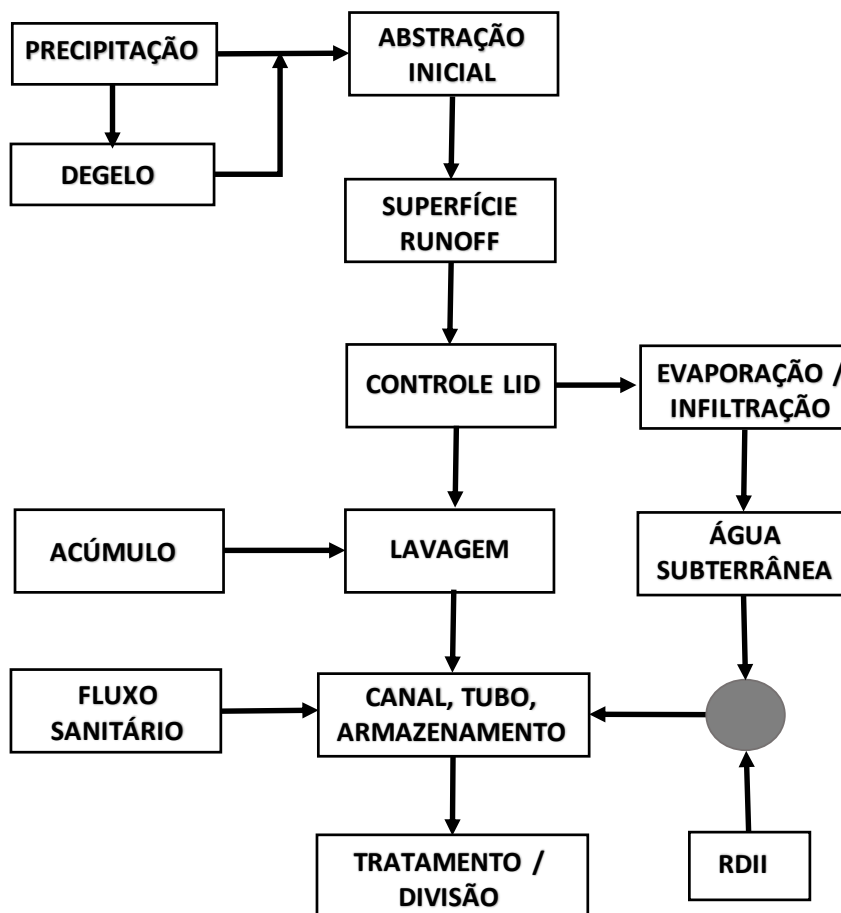


Figura 4.4 - Diagrama do processamento SWMM (EPA, 2016).

Na fase de processamento, o SWMM obtém novos valores ao longo do tempo, ou seja, a cada novo passo temporal recebe novos dados externos, e de forma dinâmica o estudo é atualizado com esses novos dados. Conforme este processo acontece, os resultados são calculados. Este processamento é representado através da Figura 4.5:

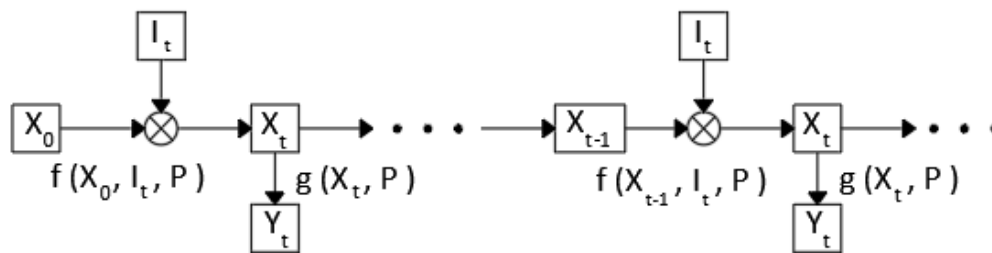


Figura 4.5 - Processo de transição de estado do SWMM (EPA,2016).

Onde:

$X_t$  = Vetor de variáveis de estado no tempo  $t$ .

$Y_t$  = Vetor de variáveis de saída no tempo  $t$ .

$I_t$  = Vetor de entradas no tempo  $t$ .

$P$  = Vetor de parâmetros constantes.

$f$  = Função de transição de estado com valor vetorial.

$g$  = Função de transformação de saída com valor vetorial.

## 4.2. Caracterização dos dados de entrada de Cabanas de Tavira - SWMM

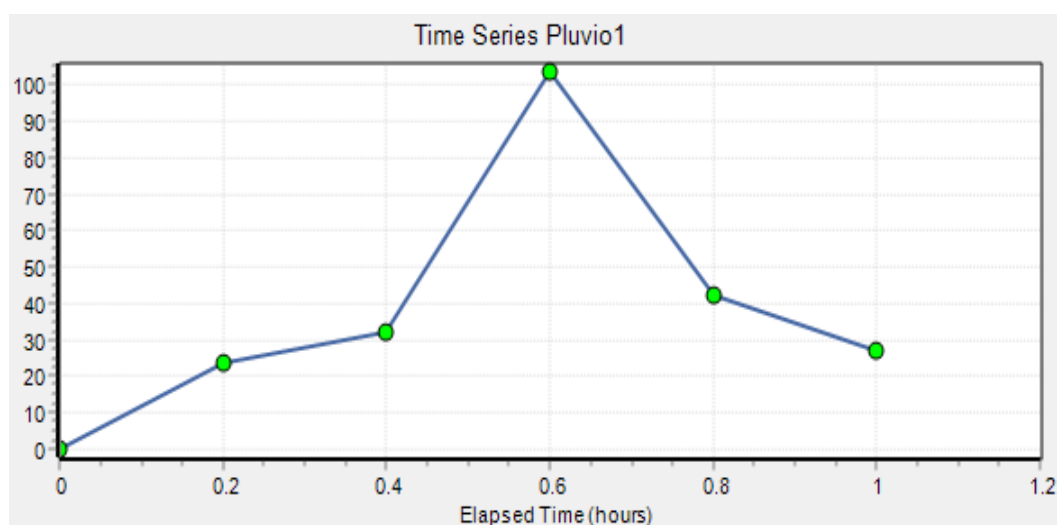
Com os dados e caracterização de Cabanas de Tavira descritos no capítulo 3, realizou-se a análise e inserção dos dados nas aplicações computacionais. Apresenta-se a seguir a descrição dos dados inseridos no SWMM.

### 4.2.1. Pluviômetro

No pluviômetro insere-se os dados da precipitação relativo ao caso de estudo. Estes dados podem ser no formato de intensidade, volume ou acúmulo. No formato intensidade a precipitação é inserida como uma taxa média ao longo do intervalo registrado, em milímetros ou polegadas /hora. Na precipitação, no formato de volume, a inserção é realizada pelo volume de chuva que caiu no intervalo registrado, em milímetros ou polegadas. O acumulativo representa a chuva acumulada que ocorreu desde o início da última série de valores diferentes de zero.

A inserção dos valores acima pode ser através de ficheiro externo ou por série de tempo realizada no próprio SWMM. Para esta dissertação adotou-se a inserção por série de tempo, onde foi informado a data de início e a intensidade pluviométrica variando no tempo. Para isto, utilizou-se os dados pluviométricos com tempo de retorno de 100 anos, conforme indicado na seção 3.3.2, gerando o Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Gráfico gerado pelo SWMM após a inserção dos dados pluviométricos com tempo de retorno de 100 anos.



#### 4.2.2. Sub-bacia

Para o desenho de uma sub-bacia, não é necessário que o seu contorno seja igual à realidade, pois as suas características serão inseridas na aplicação, funcionando apenas de forma esquemática.

As principais características a serem informadas para realizar o estudo da precipitação-escoamento são: área (ha), largura (m), inclinação (%), percentagem de área impermeável (%), coeficientes de Número de Manning ( $m^{-1/3}\cdot s$ ), profundidade de armazenamento (mm), percentagem da área impermeável sem armazenamento (%) e o método de cálculo para a infiltração.

Para a determinação das sub-bacias do caso de estudo, teve-se em consideração o uso do solo (classificação Corine), os deságues, a topografia e a comparação com a realidade. Assim, para a área de Cabanas de Tavira, obtiveram-se 21 sub-bacias, conforme representado na Figura 4.6.

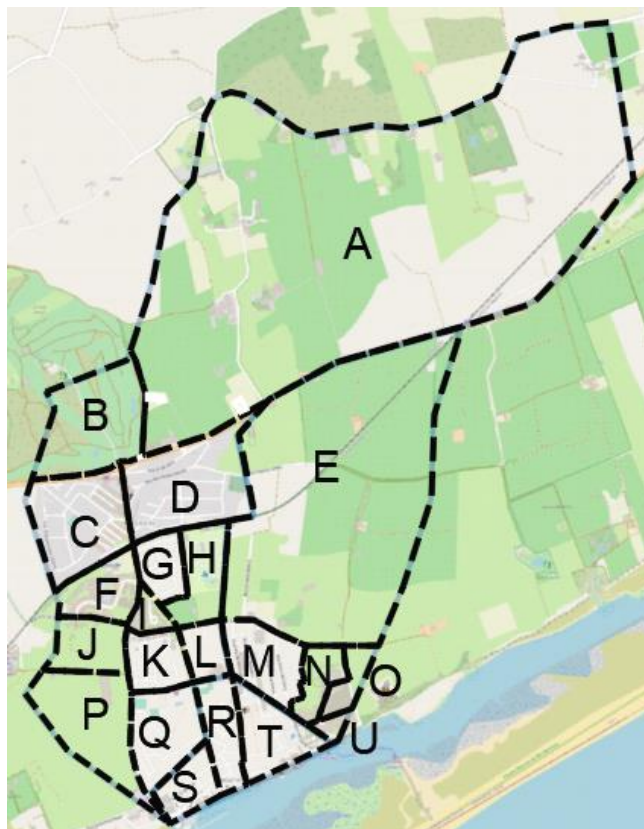


Figura 4.6 - Representação das 21 sub-bacias.

Algumas características das sub-bacias foram obtidas através das aplicações computacionais QGIS e AutoCAD (*e.g.*, área, largura, inclinação e percentagem de impermeabilização). Para os coeficientes de Número de Manning de áreas impermeáveis

e permeáveis utilizou-se os valores do Quadro 3.2, que considera a classificação CORINE. A profundidade de armazenamento (*Dstore*) foi obtida através de tabela indicada pelo SWMM, que considera o tipo de cobertura da superfície. A percentagem de área impermeável sem armazenamento consiste em áreas que possuem grandes inclinações e portando pouca capacidade de armazenamento, adotou-se 10% para áreas urbanizadas e 0% para as demais áreas. O Quadro 4.5 apresenta as características das sub-bacias inseridas no SWMM.

Quadro 4.5 – Características das sub-bacias inseridas no SWMM.

Sub - bacia	Área (ha)	Largura (m)	% Incl.	% imper.	N Imperv ( $m^{-1/3}\cdot s$ )	N Perv ( $m^{-1/3}\cdot s$ )	Dstore. Imperv. (mm)	Dstore Perv. (mm)	% Zero Imper.
A	218,4	780,00	2,74	0	0,000	0,000	1,9	5,08	0
B	17,8	397,32	5,96	0	0,048	0,000	1,9	3,8	0
C	16,6	332,00	9,68	91	0,025	0,000	1,9	3,8	10
D	20,08	354,14	4,17	100	0,040	0,013	1,9	3,8	10
E	94,37	725,92	1,94	0	0,000	0,013	1,9	5,08	0
F	7,92	275,96	4,64	94	0,064	0,000	1,9	3,8	10
G	5,44	190,88	2,46	38	0,040	0,013	1,9	3,8	10
H	8,41	165,55	1,18	63	0,025	0,015	1,9	3,8	0
I	2,44	125,77	2,78	0	0,033	0,013	1,9	3,8	10
J	7,13	237,67	3,45	12	0,025	0,000	1,9	5,08	0
K	6,53	256,08	1,83	17	0,040	0,013	1,9	3,8	10
L	4,27	165,50	2,13	22	0,026	0,015	1,9	3,8	10
M	9,42	191,85	1,83	100	0,025	0,013	1,9	3,8	10
N	4,95	141,43	1,86	70	0,000	0,013	1,9	3,8	10
O	3,62	90,50	1,65	53	0,040	0,013	1,9	3,8	10
P	16,54	348,21	1,38	0	0,040	0,013	1,9	5,08	0
Q	11,15	301,35	2,03	10	0,039	0,000	1,9	3,8	10
R	7,19	144,96	1,81	100	0,025	0,015	1,9	3,8	10
S	5,51	252,75	1,61	64	0,000	0,013	1,9	3,8	10
T	9,43	218,29	1,97	100	0,025	0,014	1,9	3,8	10
U	1,28	104,92	2,87	100	0,000	0,013	1,9	3,8	10

### 4.2.3. Conduta

As condutas são responsáveis em representar o meio que transporta um volume de um ponto a outro. Nesse estudo de caso as condutas representam os troços das ruas, para isto, utilizou-se a seção de condutas abertas e de formato retangular, conforme ilustra a Figura 4.7. A largura da seção varia conforme as ruas e a altura simula as barreiras laterais (*e.g.*, lancis, paredes ou muros), adotando 0,50m. Visto que a linha de água da Ribeira da Canada possui grande influência e capta um grande volume do escoamento, fez-se uma seção irregular para simular a rua e o canal, representado na Figura 4.8. A rugosidade foi atribuída conforme valores indicados pelo manual do SWMM. Adotou-se a média dos coeficientes de Número de Manning indicado para canais abertos em asfalto, nomeadamente 0,015.

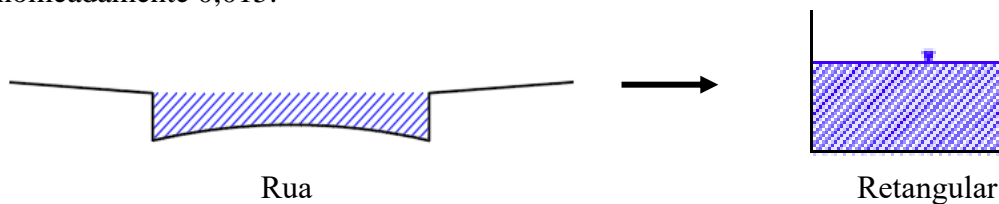


Figura 4.7 - Representação das ruas como uma secção retangular no SWMM, onde as possíveis barreiras laterais das ruas são as paredes da secção retangular.



Figura 4.8 – Foto do local e a representação no SWMM da Ribeira da Canada e rua adjacente.

#### 4.2.4. Nó de conexão

Os nós são objetos do sistema de drenagem onde se conectam diferentes troços. Fisicamente, podem representar a confluência de canais superficiais naturais, poços de visita do sistema de drenagem ou elementos de conexão de tubulações (EPA, 2015).

As principais características a serem inseridas nos nós são: a cota do fundo do nó, profundidade em relação ao terreno e se há contribuição externa de volume. Neste caso de estudo, além de unir os troços, o nó teve a função realizar as possíveis mudanças de direção que ocorriam. Desta forma, para o caso em análise nesta dissertação, a cota do fundo do nó (*invert elevation*) é a representação da cota do eixo das ruas, conforme a Figura 4.9.

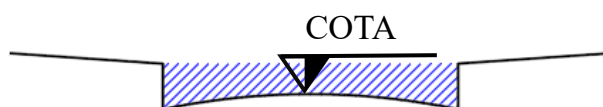


Figura 4.9 - Representação da cota que se inseriu no nó.

#### 4.2.5. FOZ

Este objeto é utilizado para representar onde a rede irá desaguar, logo, deve ser inserido a jusante do sistema. As principais características a serem inseridas são: a cota de fundo, a presença de dispositivo de contenção, tipo e condição de contorno. A análise da condição de contorno pode ser vista através das seguintes relações: profundidade de escoamento crítico ou normal na conduta; nível fixo de água; nível de maré; ou uma série de tempo que represente o nível de água no ponto de deságue.

Atribuiu-se cinco fozes: dois são referentes aos deságues das bacias da Ribeira da Canada e da Ribeira do Pocinho e os três restantes representam os deságues diretos que existem ao longo da Av. Ria Formosa (avenida adjacente à Ria formosa).

Como a jusante das sub-bacias existe a Ria Formosa, fez-se necessário a análise de dados sobre a maré. De acordo com a informação disponibilizada *on-line* pelo Instituto Hidrográfico para o porto de Faro, a maior altura de maré é de aproximadamente 3,80 m. Este valor, também deve ser encarado como conservativo, visto as maiores alturas de água ocorrerem aquando das marés equinociais, o que na região em causa não correspondem aos meses onde com mais frequência se observam maiores intensidades de precipitação. Esta altura quando convertida para o referencial utilizado na cartografia do Instituto

Geográfico e Cadastral e do Instituto Geográfico do Exército (Datum Altimétrico de Cascais) corresponde a 1,80 m.

Como a modelação está sendo realizada sobre o escoamento superficial dos arruamentos, a cota máxima de maré não influencia, pois fica abaixo da Avenida da Ria Formosa. Vale relatar que a rede de condutas é afetada, porém para o estudo desta dissertação não tem impacto, uma vez que foi admitido que o sistema de drenagem atingiu sua capacidade máxima e que o escoamento ocorre apenas sobre as ruas.

Desta forma, foi atribuído aos nós de fozes somente a cota de fundo do arruamento.

#### **4.2.6. Infiltração**

Infiltração é o processo que leva a água que está numa superfície para a camada do solo abaixo, de forma descendente. Após um determinado tempo, o solo em questão é totalmente saturado e a água submerge, contribuindo diretamente para o escoamento superficial.

O SWMM disponibiliza três modelos de infiltração: Horton, Green-Ampt e Curva-Número, sendo o último o utilizado no caso prático em estudo.

Na seção 3.4.3 apresentou-se a classificação da Curva-Número para as bacias da Ribeira da Canada e do Pocinho, porém se faz necessária a reclassificação para as sub-bacias determinadas no SWMM, para que este dado seja compatível com as características individuais. Após a obtenção dos números de escoamento, atribuiu-se o valor correspondente a cada sub-bacia.

Assim, apresenta-se na Figura 4.10 a classificação do número de escoamento das sub-bacias.

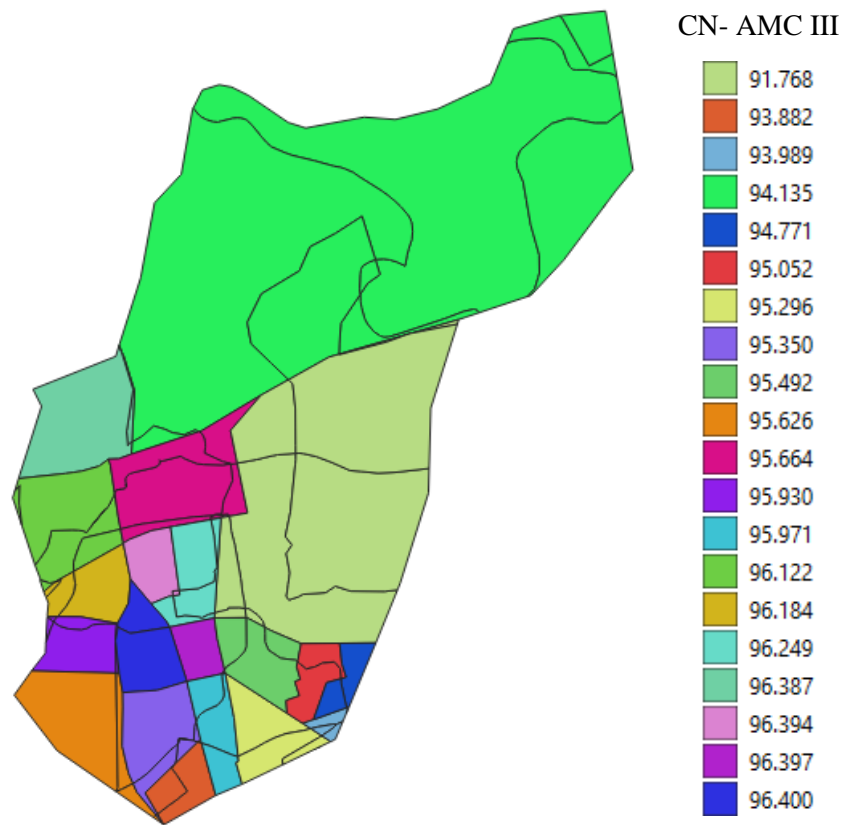


Figura 4.10 - Números de escoamento (CN- AMC III) das sub-bacias do SWMM.

#### 4.2.7. Visualização dos resultados

Após a inserção dos dados mencionados acima, obteve-se as profundidades de água ao longo do tempo conforme representado na Figura 4.11. Estas profundidades são necessárias para realizar os cálculos com o método profundidade-dano.

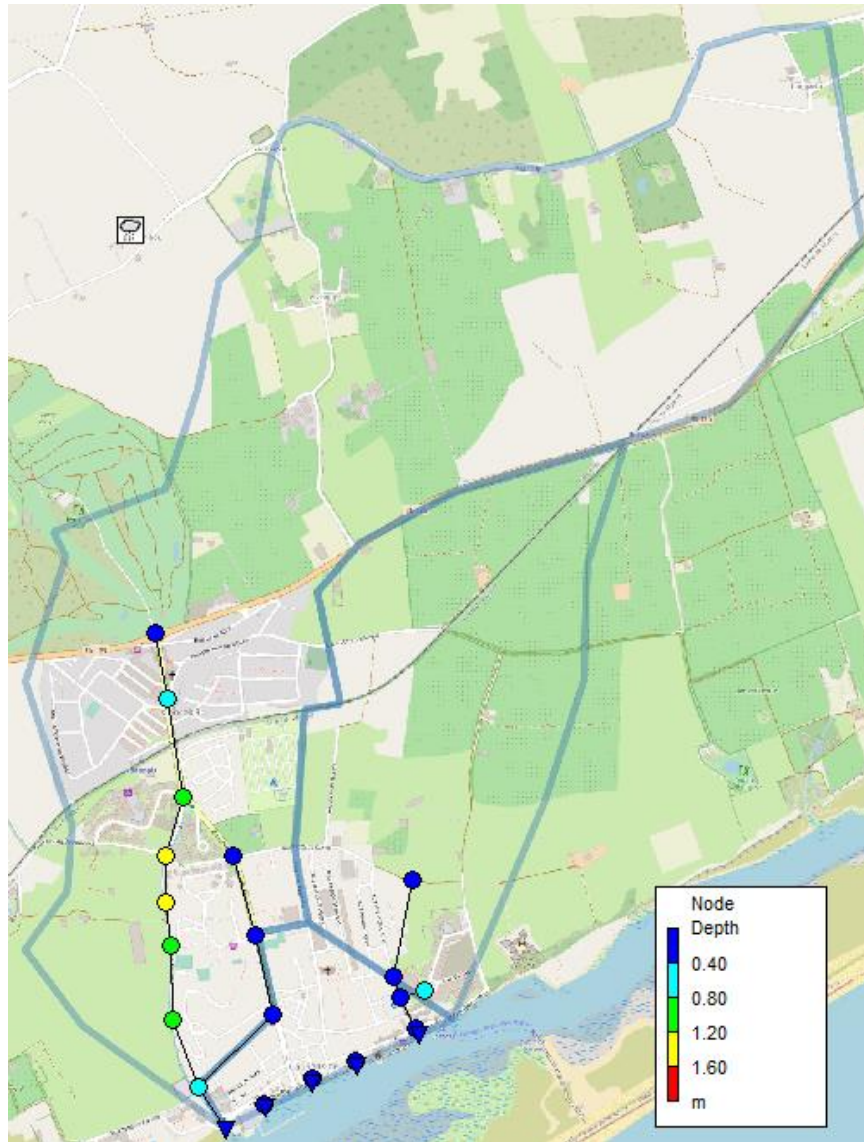


Figura 4.11 - Representação das profundidades de água obtidas após 1 hora de precipitação. Não necessariamente representam as maiores profundidades obtidas.

### 4.3. Aplicação computacional Iber

O Iber é um modelo bidimensional de águas pouco profundas (também conhecidos como modelos onda dinâmica), que realiza a modelação hidrológica e hidráulica. As áreas de aplicação abrangem a hidrodinâmica fluvial; simulação de escoamento de superfície livre e de rompimento de barragem; avaliação de áreas de inundação; cálculo de transporte de sedimentos e fluxo de ondas em estuários. O Iber resolve as equações bidimensionais de *St. Venant*, que consideram uma distribuição de pressão hidrostática e uma distribuição relativamente uniforme da velocidade e de profundidade. Estes tipos de modelos são cada vez mais utilizados no cálculo de escoamento superficial e na transformação precipitação-escoamento em bacias urbanas e rurais (Blade & Cea, 2015; Iber, 2014).

O Iber possui os módulos: hidrodinâmico, turbulência, transporte de sedimentos, qualidade da água, processos hidrológicos e habitat. Estes módulos trabalham com malha estruturada e não estruturada, podendo elas serem compostas por triângulos ou quadriláteros. Sua interface foi realizada para ser poderosa e amigável, sendo dividida em pré e pós- processamento. Esta aplicação é distribuída de forma gratuita por *Flumen Institute* e GEAMA, para esta dissertação utilizou-se a versão 2.6, disponibilizada em outubro de 2020.

### 4.3.1. Módulos e objetos

O Iber permite realizar diversos estudos e é dividido em seis módulos: hidrodinâmico, turbulência, transporte de sedimentos, qualidade da água, processos hidrológicos e habitat. Cada módulo tem suas características e os dados a serem inseridos variam conforme o estudo. No Quadro 4.6, apresenta-se os módulos e algumas de suas características.

Quadro 4.6 - Os módulos utilizados no Iber e suas características.

<b>Módulo</b>	<b>Características</b>
<b>Hidrodinâmico</b>	Resolve as equações 2D de Saint Venant. Considera os seguintes processos: Geração de ressaltos hidráulicos instáveis; Diferentes condições de contorno aberto: hidrograma, nível de maré, açude, hidrograma de fluxo de estágio; Condições internas: ponte, açude, comporta, bueiro...; Ferramentas para calcular as zonas de risco de inundação de acordo com o Regulamento de Abastecimento Público de Água; Processos hidrológicos (chuva, infiltração...)
<b>Processos hidrológicos</b>	Possui recursos que permitem o cálculo da transformação do escoamento da chuva, possibilitando o uso como um modelo hidrológico distribuído baseado nas equações 2D de águas rasas. Definição de campos de chuva a partir de pluviômetros ou de arquivos raster; Definição de perdas de chuva com diferentes modelos de infiltração; Um esquema numérico específico para aplicações hidrológicas; Utilitários para suavizar modelos de terrenos digitais mal condicionados.

Para a resolução das equações bidimensionais de *St.-Venant*, o Iber utiliza o método dos volumes finitos, com o qual a área de estudo é dividida em polígonos com três ou quatro lados, que juntos geram a malha de cálculo.

### 4.3.2. Processamento

O processamento do Iber é baseado na aplicação GiD, que divide a interface em pré e pós processamento. No pré-processo tem-se a inserção e criação das características do estudo: condições de contorno, hietograma, tipo de solo, rugosidade, geração de malha, entre outros. No processo realizam-se os cálculos. No pós-processamento tem-se os resultados, que podem ser visualizados de diversas formas: dinamicamente, através de criação de perfis longitudinais, ao longo da superfície, entre outros. A Figura 4.12, representa estes processos.

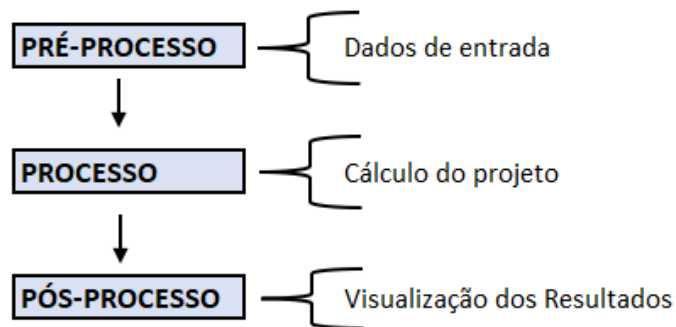


Figura 4.12 - Estrutura de processamento da aplicação computacional Iber.

#### 4.4. Caracterização dos dados de entrada de Cabanas de Tavira - Iber

##### 4.4.1. Geometria e definição da malha

No Iber não se faz necessário a criação de bacias. Inseriu-se em escala real e georreferenciado o mapa de região na aplicação. Os limites para a criação das superfícies foram determinados pelo uso do solo obtidos pela classificação CORINE, conforme indicado no Capítulo 3. Esses limites diferenciavam: ruas, tecido urbano, equipamentos desportivos / lazer e pomares. A Figura 4.13 representa a geometria e a superfície definida.

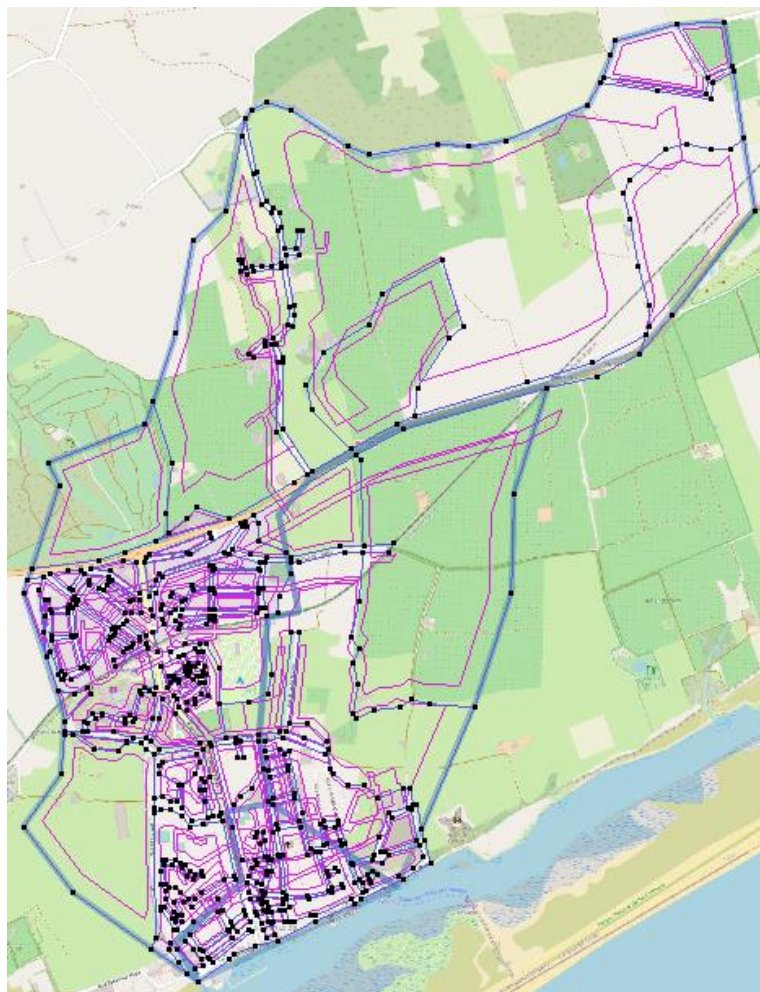


Figura 4.13 – Determinação da geometria e superfícies na aplicação Iber.

Após a determinação da geometria, criou-se a malha através da função *Generate Mesh*, Figura 4.14. A malha é fundamental para obtenção de resultados mais precisos, e

é desejável que ela seja irregular, para que melhor se adeque a geometria e que consequentemente, se aproxime mais da realidade.

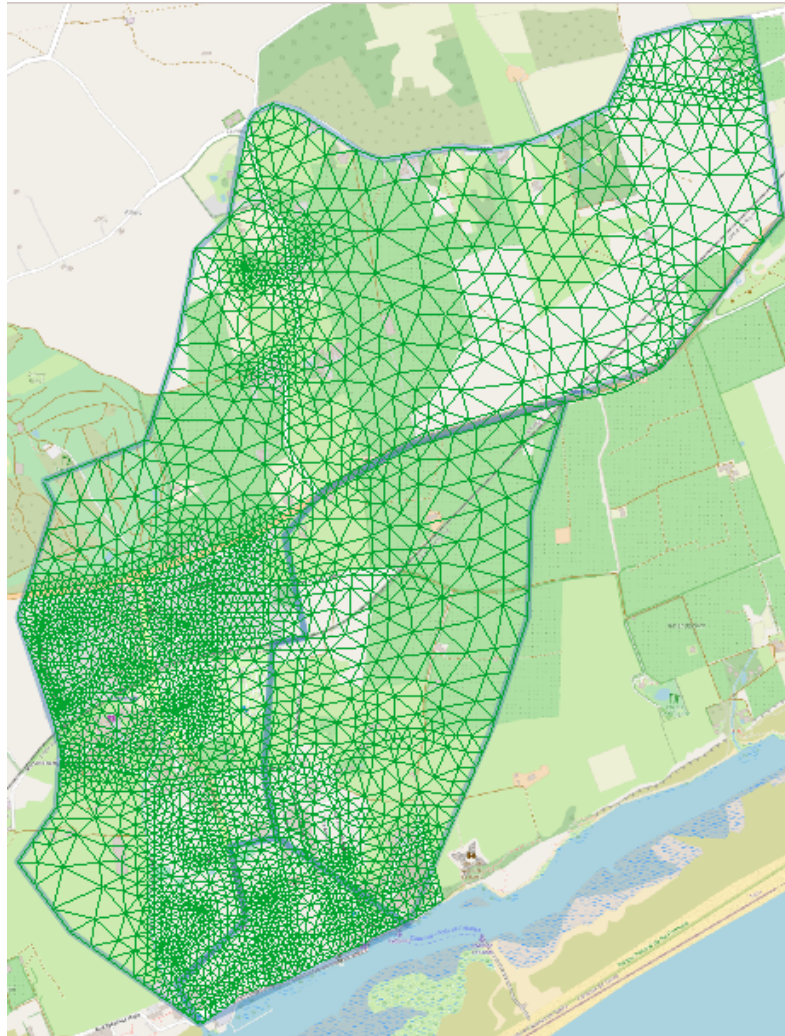


Figura 4.14 - Malha gerada no Iber através de triângulos, a partir das superfícies criadas anteriormente.

#### 4.4.2. Topografia

Para a inserção dos dados topográficos utilizou-se a função *Iber\_Tool*. Com o auxílio da aplicação QGIS criou-se um ficheiro com os dados topográficos das bacias, com extensão .TIF. E assim, atribui-se na malha os dados topográficos, sendo esse processo ilustrado na Figura 4.15.

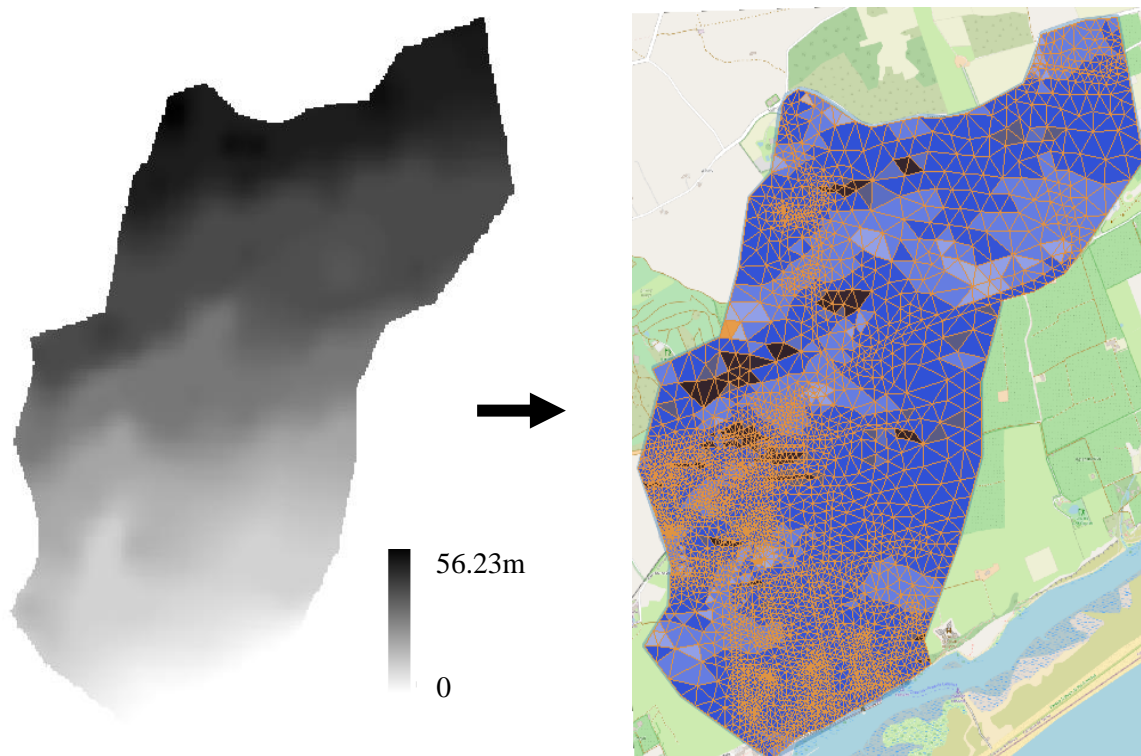


Figura 4.15 - Demonstração do formato .TIF retirado do QGIS e posteriormente atribuído à malha no Iber.

#### 4.4.3. Rugosidade

De todos os parâmetros hidráulicos envolvidos no processo, os coeficientes de rugosidade representam, provavelmente, um dos fatores principais para uma simulação numérica realista, mas são difíceis de determinar, pois sofrem influências de vários fatores (Ballesteros *et al.*, 2011).

Um importante fator de incerteza de dados de entrada na modelação de inundação é o coeficiente de rugosidade e o processo de parametrização que se segue. Uma abordagem típica para aplicação em grande escala, que usam modelos hidráulicos bidimensionais é a estimativa do coeficiente de rugosidade usando dados da classificação CORINE e tabelas de coeficiente de rugosidade padrão (Dimitriadis *et al.*, 2016).

Os valores de Número de Manning representam a rugosidade da superfície, sua variação muda conforme vegetação, inclinação e velocidade, quanto maior seu número, maior será sua resistência em relação ao escoamento sobre a superfície.

Portanto, nesse estudo utilizou-se o coeficiente de Número de Manning associado ao tipo de solo, a partir da classificação CORINE conforme Quadro 3.3. Para as ruas

utilizou-se o Número de Manning de  $0,015 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$  igualmente ao utilizado na aplicação computacional SWMM.

Na Figura 4.16 tem-se a representação dos códigos Corine e no Quadro 4.7 o valor do Número de Número de Manning associado.

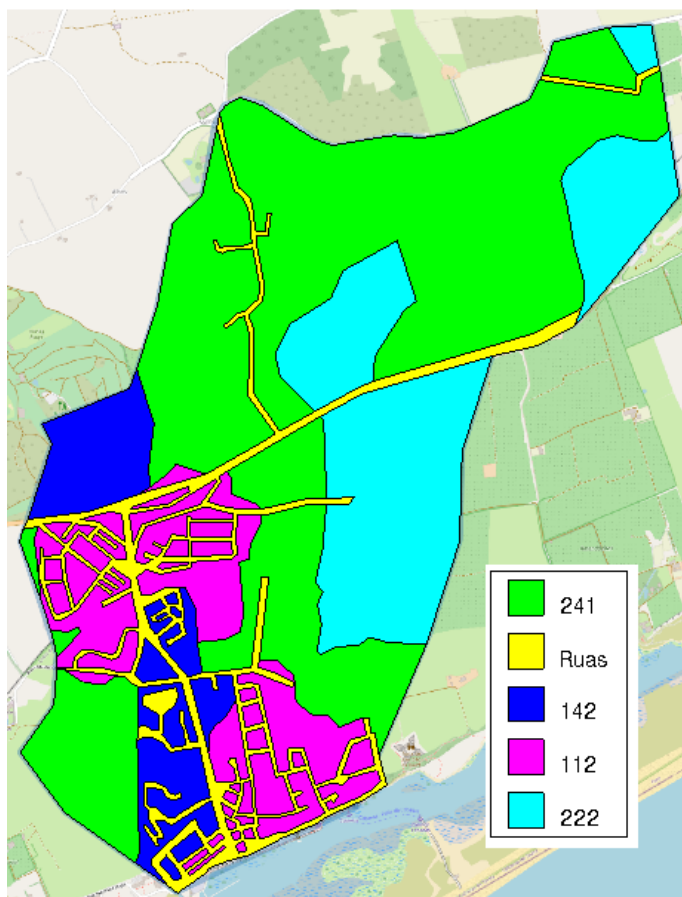


Figura 4.16 – Atribuição do uso do solo a partir da carta CORINE no Iber.

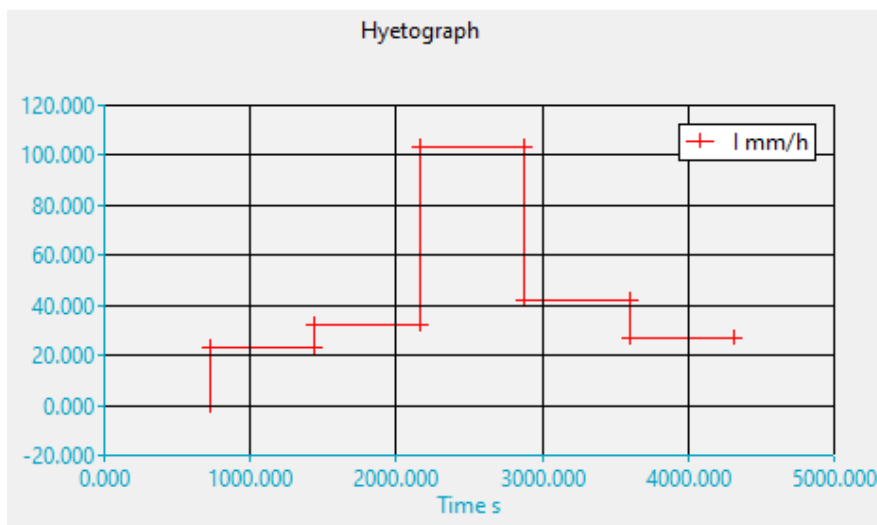
Quadro 4.7 - Valores de Número de Manning utilizados na bacia de estudo.

<b>Código CORINE</b>	<b>Definição</b>	<b>Número de Manning (n) (<math>\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}</math>)</b>
112	Tecido urbano descontínuo	0,013
142	Equipamentos desportivos, culturais e de lazer e zonas históricas	0,025
211	Ruas	0,015
222	Pomares	0,08
241	Culturas temporárias e/ou pastagens associadas a culturas permanentes	0,04

#### 4.4.4. Processo hidrológico

Para simular a precipitação utilizou-se os dados pluviométricos obtido na seção 3.3.2 com período de retorno de 100 anos. Após a inserção destes dados, que é igual ao fornecido no SWMM, mas representado de forma diferente (Quadro 4.8), atribuiu-se para toda a malha este parâmetro.

Quadro 4.8 - Gráfico gerado pelo Iber após a inserção dos dados pluviométricos com período de retorno de 100 anos.



#### 4.4.5. Infiltração

O Iber disponibiliza quatro métodos de infiltração: Horton, Modelo linear, Green-Ampt e Curva-Número. Manteve-se o método da Curva-Número, o mesmo utilizado na aplicação computacional SWMM para facilitar comparações.

O Iber não necessita da criação de bacias, portanto utilizou-se a classificação obtida pelo Método Curva-número para as bacias da Ribeira da Canada e do Pocinho, que é descrita na seção 3.4.3. A partir disto, atribuiu-se os coeficientes na malha do Iber, conforme ilustração da Figura 4.17.

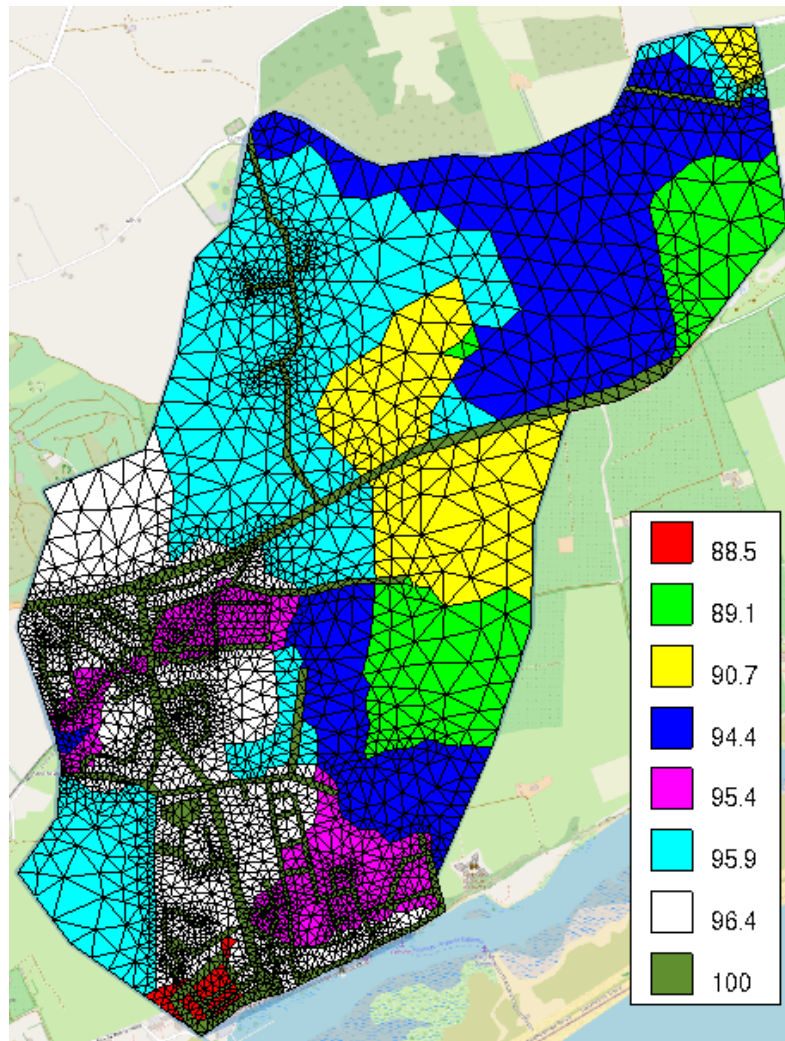


Figura 4.17 - Malha com os coeficientes de escoamento do método Curva-número.

#### 4.4.6. Condições de fronteira

Fornece o local de entrada ou saída da água do modelo e como este processo ocorre, através da indicação de volume, altura ou nível de água, entre outros. Neste caso de estudo informou-se o local de saída do escoamento, que foi atribuído a jusante das bacias, ou seja, na linha da malha que representa o limite entre a avenida e a Ria Formosa.

#### 4.4.7. Visualização dos resultados

Para o cálculo dos danos utilizando o método Profundidade-dano, faz-se necessário a obtenção das profundidades de água da inundação. O Iber por ser um modelo 2D tem a possibilidade de representar os resultados na superfície e ao longo do tempo. A Figura 4.18 representa a altura de água na superfície no tempo de 60 minutos, ou seja, 1 hora, mas não necessariamente é a maior profundidade de água, pois isso varia conforme o local e tempo.

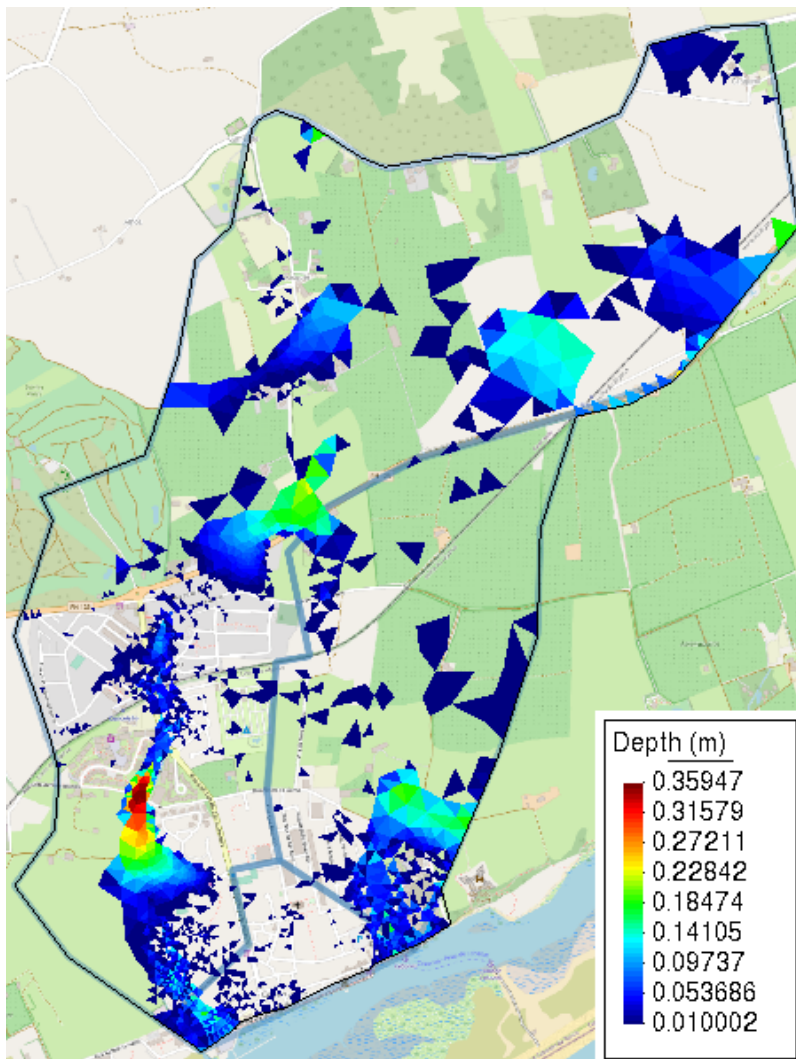


Figura 4.18 - Representação da profundidade de água na superfície no tempo de 1 hora.

## **5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

No Capítulo 4, tem-se a descrição do processo da modelação, os dados utilizados e os resultados de cada aplicação computacional.

Este capítulo 5 tem por finalidade apresentar a comparação entre os resultados individuais das duas aplicações utilizadas e os danos causados. Ao comparar os resultados, deve-se ter consideração que os mesmos não devem necessariamente, serem iguais, devido existir diversas diferenças entre as duas aplicações, nomeadamente: tipo de modelação, o modo de inserção de dados, escoamento, entre outros.

Para melhor visualização dos resultados, inicialmente realiza-se uma comparação entre as profundidades da água em pontos que representem cenários distintos da área de estudo: a Ribeira da Canada, Ribeira do Pocinho, uma área urbanizada e uma rua.

Em seguida, utiliza-se o método profundidade-dano para calcular os danos gerados após uma cheia urbana. Para possuir as mesmas áreas afetadas por esta cheia, e a nível de comparação, utilizou-se como divisão as sub-bacias determinadas no SWMM.

### **5.1. Pontos analisados**

Para a comparação entre as profundidades de água das duas aplicações, tentou-se representar locais que representassem diferentes cenários da região. A partir disto, atribuiu-se pontos para obter a profundidade de água informada pelas duas aplicações e então realizar a comparação. Os cenários escolhidos e os respectivos pontos de análise foram: Ribeira da Canada (A, B e C), área urbanizada (D), Ribeira do Pocinho (E), rua (F), conforme indicado na Figura 5.1.

No Quadro 5.1 apresenta-se a profundidade máxima de água obtida nestes pontos e nas duas aplicações computacionais.



Figura 5.1 - Indicação dos pontos utilizados para realizar a comparação da profundidade de água nas duas aplicações.

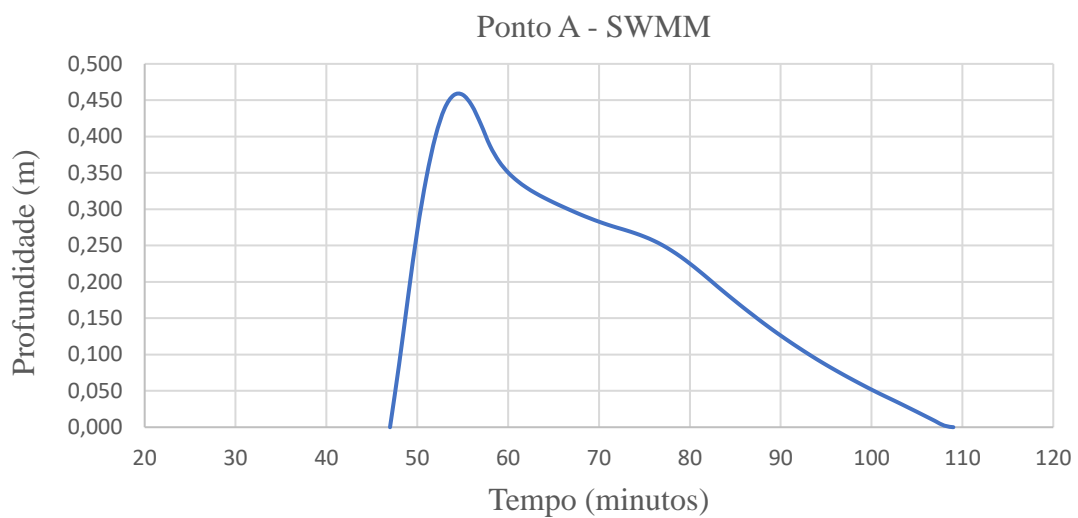
Quadro 5.1 – Profundidade máxima de água obtida nos pontos analisados.

Ponto	Profundidade máxima de água (m)	
	SWMM	Iber
A	0,46	0,42
B	0,48	0,29
C	0,39	0,13
D	0,18	0,01
E	0,27	0,02
F	0,24	0,11

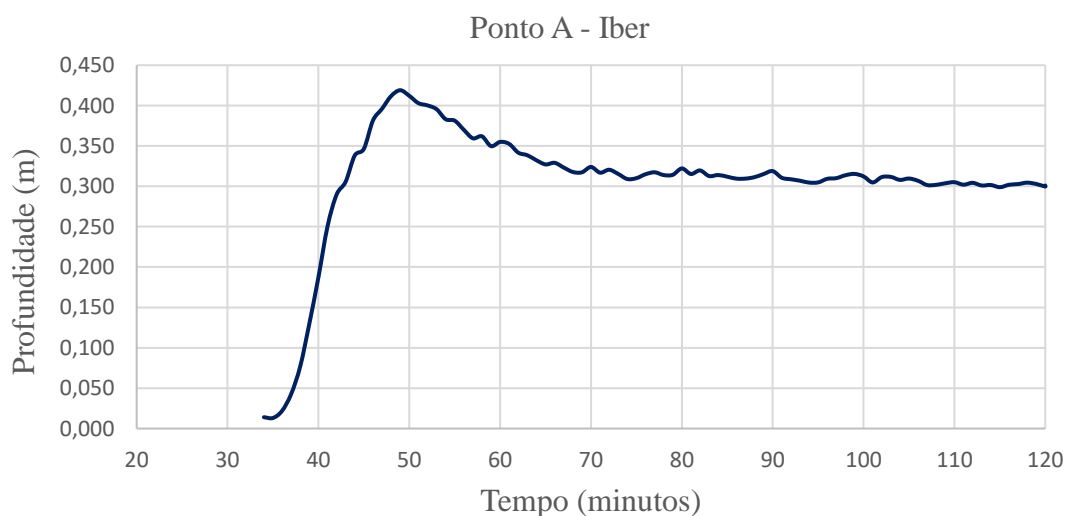
- **Ponto A**

O primeiro ponto de análise encontra-se na Ribeira da Canada. As profundidades dos pontos dessa área no SWMM, indica a água excedente que escoo pelas ruas, após o canal ficar totalmente cheio. Ou seja, após a Ribeira encher totalmente, a rua adjacente atinge a profundidade máxima de 0,46m de água. O escoamento na rua no SWMM se inicia por volta dos 47 minutos, Quadro 5.2. No Iber observa-se que o escoamento inicia aos 35 minutos e água atinge a profundidade máxima de 0,42 m, Quadro 5.3. Observa-se que o escoamento nessa região se espraia em uma maior área do que as barreias existentes (*e.g.*, muros e construções) permitiriam.

Quadro 5.2 - Evolução da profundidade de água do ponto A, no SWMM.



Quadro 5.3 - Evolução da profundidade de água do ponto A, no Iber.

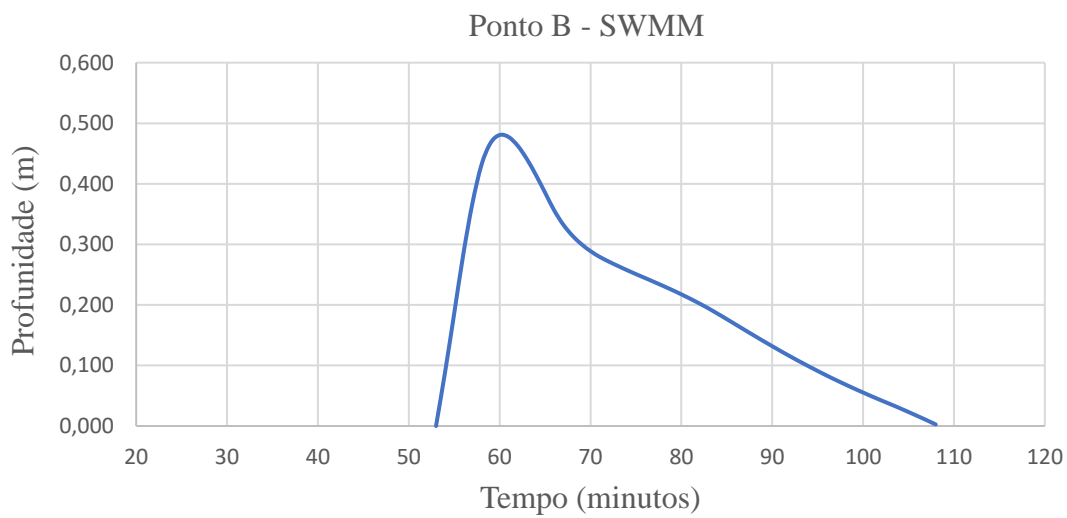


- **Ponto B**

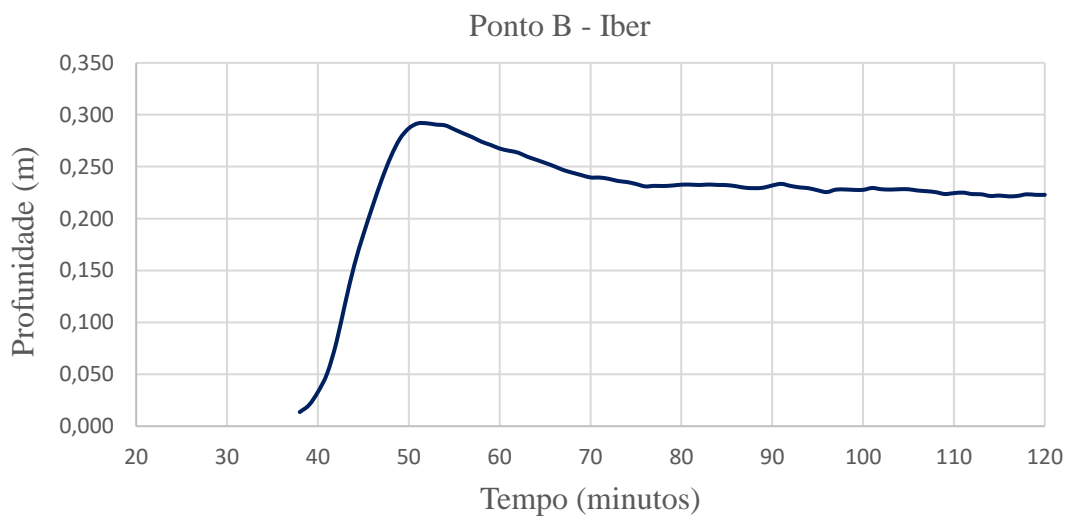
Este ponto também se situa na Ribeira da Canada e observa-se que o mesmo padrão de escoamento ocorre.

Por ser um ponto mais a jusante, o início do escoamento acontece um pouco mais tarde do que o ponto anterior. No SWMM inicia aos 54 minutos e atinge o pico de 0,49m de profundidade, Quadro 5.4. O escoamento inicia aos 38 minutos no Iber e atinge profundidade de 0,29m, Quadro 5.5.

Quadro 5.4 - Evolução da profundidade de água do ponto B, no SWMM.



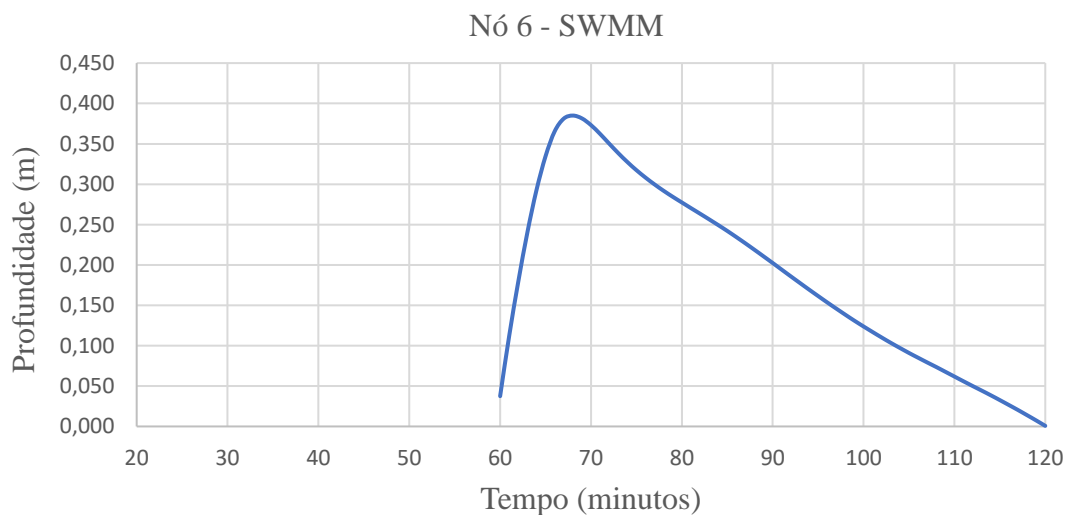
Quadro 5.5 - Evolução da profundidade de água do ponto B, no Iber.



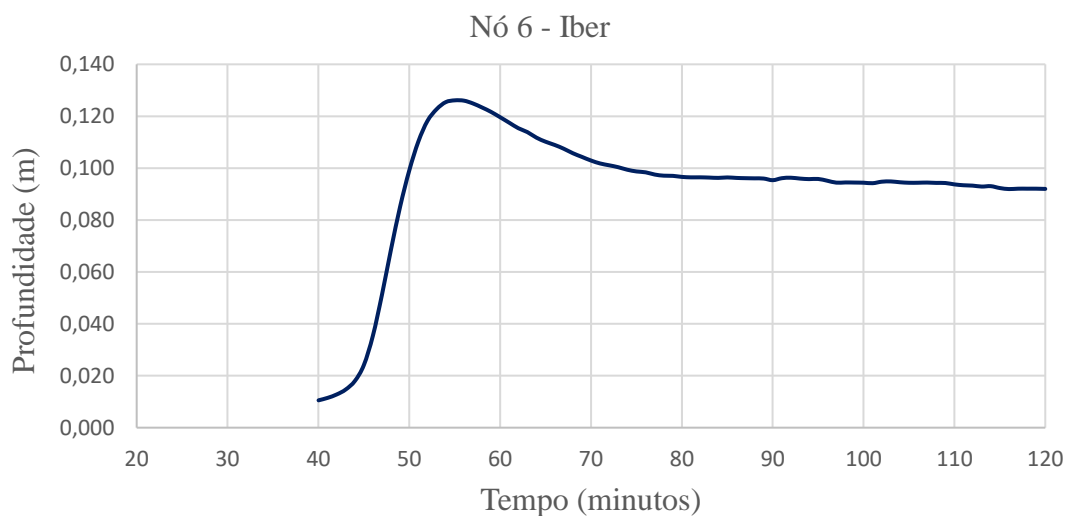
- **Ponto C**

Igualmente aos pontos anteriores e que estão na Ribeira da Canada, o padrão de escoamento permanece, Quadros 5.6 e 5.7. Observa-se que no Iber a profundidade de água nos 3 pontos da Ribeira da Canada, aumenta de forma mais rápida do que no SWMM. Este fato acontece devido o Iber não possuir a caracterização do canal e então a água se espalha mais rapidamente sobre a superfície. Além disso, no SWMM logo após o pico, a profundidade de água desce bruscamente, isto representa que o canal facilita o escoamento. Observa-se também, que após duas horas somente haverá escoamento no canal. O contrário ocorre no Iber, que após o pico, a água continua a escoar lentamente na superfície.

Quadro 5.6 - Evolução da profundidade de água do nó 6, no SWMM.



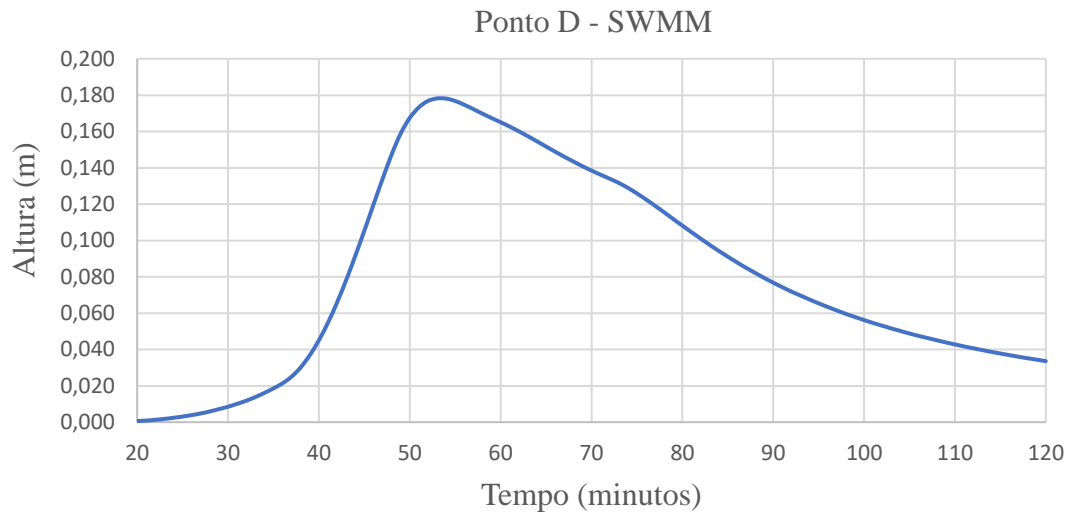
Quadro 5.7 - Evolução da profundidade de água do nó 6, no Iber.



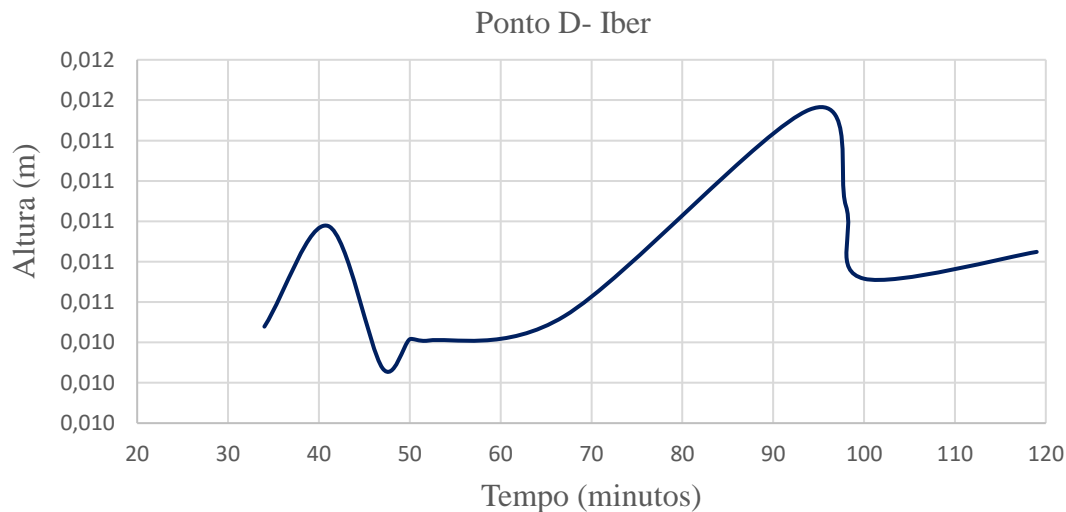
- **Ponto D**

Este ponto está localizado em uma área predominantemente urbana. Ao analisar as profundidades das duas aplicações nota-se que existe uma diferença entre elas, Quadro 5.8 e Quadro 5.9. Julga-se que esta diferença está relacionada com a forma como o Iber faz o tratamento de frentes secas. O modelo necessita que exista uma profundidade mínima de 0,01m de água, para que tenha movimento, isto facilita a resolução das equações, pois com alturas muito baixas geram velocidades irreais.

Quadro 5.8 - Evolução da profundidade de água no ponto D, no SWMM.



Quadro 5.9 - Evolução da profundidade de água do ponto D, no Iber.

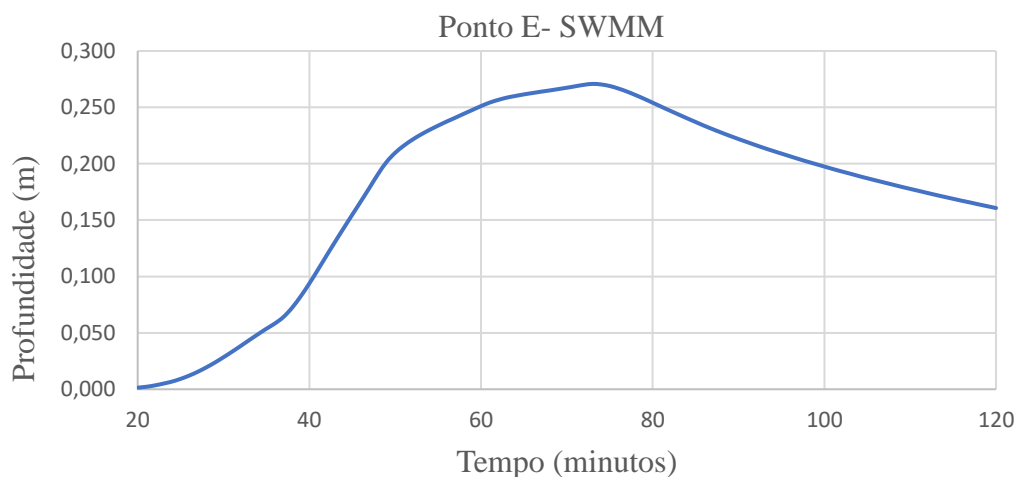


- **Ponto E**

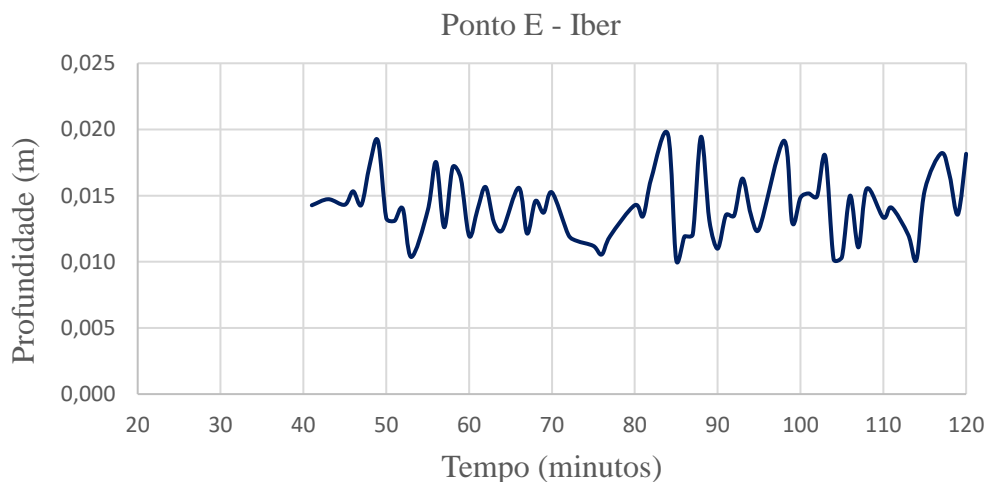
Este ponto está na linha d'água da Ribeira do Pocinho. No SWMM a profundidade máxima atinge 0,27m, Quadro 5.10, enquanto no Iber fica por volta 0,02m, Quadro 5.11. Ao observar a Figura 4.19, nota-se que a montante do nó, há uma área com maior concentração e profundidade (0,20m) de água. Esta área corresponde a uma zona verde onde passa a linha d'água desta bacia. A diferença de profundidade está relacionada ao fato de o Iber dispersar o escoamento e o SWMM concentrar em um nó da sub-bacia.

A profundidade no Iber oscila entre 0,01m a 0,02m, o que fornece este formato de gráfico. Isto acontece devido ao processo numérico e também pela aplicação considerar que todo escoamento abaixo de 0,01m está parado e acima de 0,01m ocorre movimento.

Quadro 5.10 - Evolução da profundidade de água do ponto E, no SWMM.



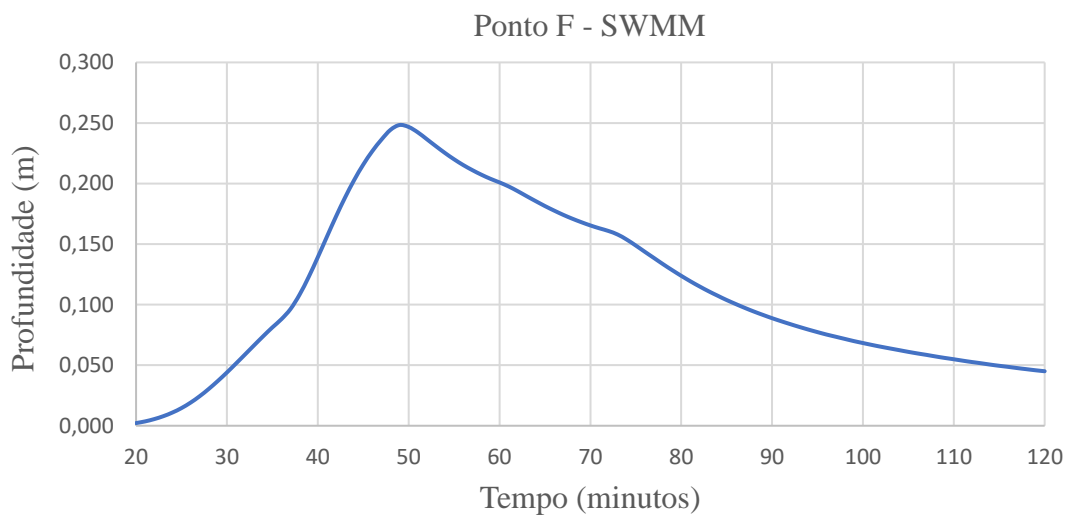
Quadro 5.11 - Evolução da profundidade de água do ponto E, no Iber.



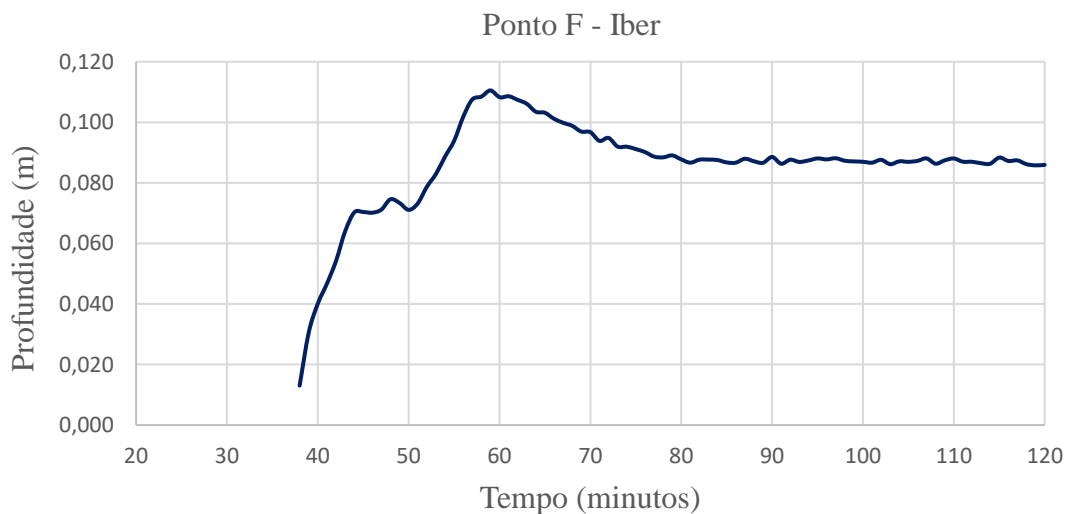
- **Ponto F**

Este ponto está localizado na rua adjacente a Ria Formosa, próxima aos deságuas. Observa-se que a profundidade máxima de água no SWMM é maior do que no Iber, 0,24 e 0,11m respectivamente, Quadro 5.12 e Quadro 5.13. Ao observar o resultado do Iber através da Figura 4.19, observa-se que o escoamento tende a ir e se concentrar na Ribeira da Canada, diminuindo o escoamento na rua vizinha. No SWMM, é atribuído uma sub-bacia urbanizada para este ponto, o que tende a fazer com que altura seja maior, do que no Iber.

Quadro 5.12 - Evolução da profundidade de água do ponto F, no SWMM.



Quadro 5.13 – Evolução da profundidade do nível de água do ponto F, no Iber.



## 5.2. Danos

Para o cálculo dos danos devido a inundação, utilizou-se o método profundidade-dano, que relaciona a profundidade de água com o dano monetário no patrimônio construído. Para este cálculo, obteve-se as profundidades máximas de água nas duas aplicações computacionais. E para que a comparação entre os dois modelos seja possível, as sub-bacias utilizadas no SWMM serviram como base para que ambas aplicações possuíssem as mesmas áreas afetadas.

A aplicação SWMM por ser um modelo 1D e utilizado com o escoamento na superfície, não fornece a localização da inundação. Desta forma, escolheu-se os nós atribuídos como descarga de cada sub-bacia, para fornecer a profundidade máxima de água que as afeta.

O Iber apesar de não fornecer o local de inundação, ele representa a profundidade do escoamento na superfície. Mas como um facilitador para a comparação, admitiu-se que no Iber as áreas afetadas são as sub-bacias do SWMM e então verificou-se qual a profundidade máxima de água dentro delas.

Como indicado por Huizinga *et al.*, (2017), para o cálculo do dano existem seis divisões que auxiliam no cálculo e variam conforme o tipo de construção, nomeadamente: construções residenciais e comerciais, infraestruturas (ruas), transportes (veículos), indústrias e agriculturas. Para as construções residenciais e comerciais, o dano é dividido em estrutural e não estrutural. Entende-se como estrutural toda a parte construída do patrimônio e como não estrutural o conteúdo interno da construção.

Na região, não foi detectado indústrias de grande porte que afetassem de forma significativa os cálculos. Portanto, obteve-se as áreas residenciais, comerciais, infraestruturas, transportes e de agricultura, para este processo utilizou o QGIS e AutoCAD. Para o cálculo das infraestruturas e transportes, utilizou-se as áreas referentes as ruas de cada sub-bacia, exemplificado na Figura 4.21. E assim, para cada área de sub-bacia, obteve-se a taxa de ocupação (%) de cada uma dessas cinco divisões de construção.

Após a obtenção das respectivas áreas, calculou-se os danos das cinco divisões de danos, conforme a sub-bacia e para cada aplicação computacional. Atenta-se que para o cálculo foi realizado considerando que toda a sub-bacia foi afetada com a mesma profundidade de água, para que os valores fossem comparáveis, o que pode acrescer o valor do dano. Os Anexos A e B, mostram os cálculos de cada sub-bacia.

A Figura 5.2 representa como foram retiradas as áreas de cada sub-bacia, tendo como exemplo a sub-bacia I. O Quadro 5.14 é apresentado os passos que foram utilizados para o cálculo do dano: área total da sub-bacia x fator de dano correspondente a profundidade de água x taxa de ocupação e transformação de ha em m<sup>2</sup> x custo = Dano. E o Quadro 5.15 apresenta o resumo dos danos de acordo com os resultados das duas aplicações.



Figura 5.2 - Representação das áreas retiradas na sub-bacia I, para o cálculo do dano.

Quadro 5.14 - Dados utilizados para o cálculo dos danos na sub-bacia I.

					Construções residenciais			
Área (ha)	Prof. de água (m)	Fator de dano	Área (ha)	Ocup. (%)	Custo €/m <sup>2</sup>	Dano estrutural (€)	Custo €/m <sup>2</sup>	Dano não estrutural (€)
2,4	0,17	0,09	1,9	80	€ 411,00	€ 722.044,80	€ 205,00	€ 360.144,00

Quadro 5.15 - Resumo dos danos devido as profundidades de água obtidas nas duas aplicações.

	SWMM	Iber
Residencial	€ 98.663.488,0	€ 38.546.754,4
Comercial	€ 28.751.925,3	€ 9.718.997,9
Infraestrutura	€ 619.476,8	€ 199.600,8
Transporte	€ 23.614.993,4	€ 7.582.895,7
Agricultura	€ 64.397,5	€ 41.860,7
<b>Total</b>	<b>€ 151.714.281,0</b>	<b>€ 56.090.109,6</b>

### 5.3. Discussão

As ruas de uma região, estão normalmente interligadas entre si (criando uma malha), o que possibilita que o escoamento superficial percorra e se distribua em toda a malha. A aplicação SWMM não permite que os troços sejam interligados, mas ramificados, ou seja, impede a criação de malha. Desta forma, teve-se que desenhar apenas algumas ruas, o que faz com que elas recebam maior quantidade de escoamento e conseqüentemente maior profundidade de água do que o real. Isto pode ser visto ao comparar as profundidades de água entre as aplicações utilizadas: o SWMM apresenta maiores profundidades de água em todos os pontos de análise.

Devido a se ter utilizado a topografia natural (sem considerar as construções existente) de Cabanas de Tavira, observou-se no Iber, que o escoamento ultrapassou os limites da estrutura real do local, ou seja, invadiu locais onde barreiras físicas existentes (*e.g.*, muros, lancis) impediriam, até uma determinada profundidade, o avanço do escoamento. Logo, sem estas barreiras, o escoamento tende a espalhar mais do que o real, e, portanto, a profundidade da água tende ser menor.

Inicialmente, nota-se nas duas aplicações que as maiores profundidades de água, ocorrem na região urbanizada, que se localiza a jusante das bacias, próxima a Ria Formosa. As áreas a montante são ocupadas predominantemente pela agricultura, e, portanto, mais permeável.

Para o cálculo do dano, que utiliza a profundidade da água de inundação, considerou que cada sub-bacia foi afetada com a profundidade máxima em sua totalidade e não somente na área que ocorre. Isto faz com que áreas onde possivelmente não iriam ser afetadas (*e.g.*, devido ser mais alta em questão de topografia ou fatores que impediriam cheia), sejam incluídas no cálculo do dano. Assim, os valores dos danos causados podem ser considerados simbólicos e não específicos.



## 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O processo de urbanização com mal planeamento pode, indiretamente, afetar as infraestruturas de uma região, como os sistemas de drenagem pluvial, que é o tema abordado nesta dissertação. Não é possível controlar o crescimento urbano como um todo, mas algumas medidas foram e estão a ser criadas para integrar a urbanização com os sistemas de drenagem pluvial e assim evitar ou mitigar as cheias e inundações urbanas. Como exemplo destas medidas, pode-se citar a Diretiva n.º 2007/60/CE que visa a gestão e avaliação de inundações a nível europeu. Pode-se citar também o conceito ambientalista de drenagem, que surgiu por volta do ano de 1990, como uma das alternativas da drenagem urbana, visando o desenvolvimento de sistemas de drenagem mais sustentáveis. A modelação hidrológica e hidráulica surge assim como uma ferramenta para uma melhor conceção e gestão dos sistemas de drenagem, ajudando a prevenir e controlar as cheias e inundações.

Os danos que uma cheia ou inundação causam podem ser divididos em tangíveis e intangíveis, sendo os tangíveis calculados monetariamente. Esta dissertação teve como foco os danos tangíveis no património construído. O impacto que as construções sofrem têm origem nas ações provocadas pela água, e tem como consequências a deformação e/ou colapso de estruturas, alteração das características dos solos, contaminação dos materiais de construção, entre outras. Um dos meios para o cálculo destes danos consiste no método de profundidade-dano, que a partir da profundidade da água da cheia/inundação, permite estimar o valor monetário do impacte.

Para obter os danos do caso em estudo, iniciou-se este trabalho com a caracterização da região de Cabanas de Tavira. Obtiveram-se os dados pluviométricos, topografia, tipo e uso do solo, e definição das linhas d'água. Cabanas de Tavira possui duas linhas d'água principais (Ribeira da Canada e Ribeira do Pocinho), e a partir destas delimitaram-se as duas respetivas bacias hidrográficas. Estas duas bacias, no seu conjunto, possuem cerca de 70% da área ocupada por culturas temporárias, de pastagem ou por pomares, existindo concentração da área urbanizada nas áreas de jusante.

A partir da caracterização das bacias e conforme o tipo de modelação a realizar (uni ou bidimensional), inseriram-se os dados necessários nas duas aplicações computacionais utilizadas para a modelação (SWMM e Iber). Diante da análise aos resultados indicados no Capítulo 5, conclui-se que as duas aplicações forneceram resultados aceitáveis conforme o tipo de modelação que realizam. Devido a alguns

critérios escolhidos para a modelação, observa-se que existem lacunas, que poderão ser resolvidas conforme indicado nos desenvolvimentos futuros.

Na modelação 1D que foi realizada com a aplicação computacional SWMM, concluiu-se que por ser um modelo concentrado, realiza a homogeneização das características das sub-bacias, o que faz com que os resultados não sejam muito precisos caso a discretização das bacias não seja suficientemente detalhada. Outro ponto que se julga ser negativo é que os modelos 1D com o escoamento na superfície, não demonstram a área real afetada pela profundidade de água.

Com o Iber, realizando a modelação 2D, observou-se que por se utilizar a topografia natural, o escoamento percorreu superfícies que as construções existentes não permitiriam. Contudo, uma das grandes vantagens desta aplicação é a visualização das profundidades de água ao longo de toda superfície em estudo, o que para o cálculo do dano mostra-se como uma grande vantagem, pois é possível obter a área realmente afetada de modo mais direto e preciso.

A partir dos resultados das profundidades de água das duas aplicações, procedeu-se ao cálculo dos danos. O método utilizado foi o de profundidade-dano, que fornece os danos estruturais e não estruturais, em construções residenciais, comerciais, nas infraestruturas, no transporte e na agricultura; o dano causado pela cheia/inundação está representado no formato monetário, tendo em consideração o valor econômico do património existente. O valor econômico é parametrizado conforme o tipo de construção, *e.g.*, o valor do dano total por m<sup>2</sup> de um comércio é cerca de 40% maior do que de uma residência. Ao comparar os valores dos danos obtidos a partir das duas aplicações, observa-se uma grande diferença. Porém, por trás desta diferença, existem diversos fatores que contribuem para esta realidade, nomeadamente: diferença na modelação, caracterização das bacias e no formato que apresentam os resultados. Além disto, para realização do cálculo, admitiu-se que toda a sub-bacia foi afetada igualmente pela profundidade máxima de água, fazendo com que os valores de danos apresentados sejam apenas representativos.

Diante dos fatos mencionados, apresenta-se a seguir indicações para possíveis desenvolvimentos futuros deste trabalho:

- Criação de mais sub-bacias no SWMM de modo a discretizar da melhor forma possível as características do local, fazendo com que o SWMM se torne um modelo quasi-distribuído;

- Ainda no SWMM, sugere-se inserir mais troços, para que o escoamento seja distribuído em maior número de ruas;
- No Iber, indica-se que a topografia abranja o terreno natural bem como as construções existentes;



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulkareem, J. H., Pradhan, B., Sulaiman, W. N. A., & Jamil, N. R. (2018). Review of studies on hydrological modelling in Malaysia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(4), 1577–1605. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0509-y>
- Albano, R., Sole, A., Adamowski, J., Perrone, A., & Inam, A. (2018). Using FloodRisk GIS freeware for uncertainty analysis of direct economic flood damages in Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73(June), 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.019>
- Alegre, H., & Covas, D. (2010). Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água. Uma abordagem centrada na reabilitação. *Série Guias Técnicos Nº 16*, 510. [https://poseur.portugal2020.pt/media/4039/guia\\_tecnico\\_16.pdf](https://poseur.portugal2020.pt/media/4039/guia_tecnico_16.pdf)
- Almeida, L., & Serra, J. C. V. (2017). Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Revista Da FAE*, 20(1), 129–137. <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>
- Ambrosio, A. (1998). O envolvimento dos sectores público e privado no abastecimento de água e na drenagem e tratamento de águas residuais em Portugal. *APRH - Associação Portuguesa Dos Recursos Hídricos*, 1(August), 117–125.
- Anker, Y., Mirlas, V., Gimburg, A., Zilberbrand, M., Nakonechny, F., Meir, I., & Inbar, M. (2019). Effect of rapid urbanization on Mediterranean karstic mountainous drainage basins. *Sustainable Cities and Society*, 51(February), 101704. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101704>
- Araújo Neto, J. R., Palácio, H. A. de Q., De Andrade, E. M., Dos Santos, J. C. N., & Pinheiro, E. A. R. (2012). Otimização Do Número De Curva (Cn-Scs) Para Diferentes Manejos Na Região Semiárida, Ceará, Brasil. *Irriga*, 1(01), 264. <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v1n01p264>
- Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Sanchez-Silva, M., & Stoffel, M. (2011). Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*, 403(1–2), 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.045>
- Bard, I., Breguet, M., P.E. Noiroto-Cosson, & Palladin, pierre. (2010). *Le risque inondationen zone urbanisée.*
- BBC. (2021). *Europe's floods: Lessons from German tragedy.* <https://www.bbc.com/news/world-europe-58992093>
- Blade, E., & Cea, L. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Journal of the American Water Resources Association*, 5(3), 2–2. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M., Dolz, J., Aragón-Hernández, J. L., Corestein, G., & Sánchez-Juny, M. (2012). Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels. *Advances in Water Resources*, 42, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.021>

- Bulti, D. T., & Abebe, B. G. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1293–1302. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00803-z>
- Burian, S. J., & Edwards, F. G. (2002). Historical perspectives of urban drainage. *Global Solutions for Urban Drainage*, 40644(September), 1–16. [https://doi.org/10.1061/40644\(2002\)284](https://doi.org/10.1061/40644(2002)284)
- Canholi, A. P. (2014). *Drenagem urbana e controle de enchentes*. Oficina de textos.
- Carrington, D. (2021). *No Title Climate crisis made deadly German floods 'up to nine times more likely*. <https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/23/climate-crisis-made-deadly-german-floods-up-to-nine-times-more-likely>
- Chou, C., & Lan, C. W. (2012). Changes in the annual range of precipitation under global warming. *Journal of Climate*, 25(1), 222–235. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00097.1>
- Christofidis, D., Assumpção, R. dos S. F. V., & Kligerman, D. C. (2019). A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. *Saúde Em Debate*, 43(spe3), 94–108. <https://doi.org/10.1590/0103-11042019s307>
- CNN. (2022). *Após chuvas, Petrópolis (RJ) amanhece com carros virados e casas destruídas; veja imagens*. <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/apos-chuvas-petropolis-rj-amanhece-com-carros-virados-e-casas-destruidas-veja-imagens/>
- Costa, F. da S. (2010). Influence of flood frequency on residential building losses. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(10), 2145–2159. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-2145-2010>
- Costa, F. da Silva. (2020). *Riscos de inundação e suas manifestações*. Departamento de Geografia CEGOT, Universidade do Minho, Portuga.
- Devi, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- DGSCGC. (2016). *Guide S3 dispositif spécifique inondation*.
- Diário da República. (2020). Despacho n.º 5316/2020 de 7 de Maio de 2020. <https://files.dre.pt/2S/2020/05/089000000/0008500087.Pdf>, 85–87.
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., Koutsoyiannis, D., & Efstratiadis, A. (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*, 534, 478–492. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020>
- Directiva60/CE. (2007). DIRETIVA 2007/60/CE do Parlamento europeu e do conselho. *Jornal Oficial Da União Europeia*, 149(11), 533–534. <https://doi.org/10.1024/0036-7281.149.11.533>
- Drdacky, M. F. (2010). Flood Damage to Historic Buildings and Structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(5SI), 439–445.
- Epal. (2018). *As Águas Subterrâneas*.

- ERSAR. (2017). *Relatório de Monitorização do PENSAAR 2020 PENSAAR 2020-Uma Nova Estratégia para o Sector de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais*. 62. [http://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/Documents/MonitorizaçãodoPENSAAR2020\\_ERSAR.pdf](http://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/Documents/MonitorizaçãodoPENSAAR2020_ERSAR.pdf)
- Euronews. (2021). *Líderes europeus reagem às inundações na Europa Central*. <https://pt.euronews.com/2021/07/16/lideres-europeus-reagem-as-inundacoes-na-europa-central#>
- Feng, B., Wang, J., Zhang, Y., Hall, B., & Zeng, C. (2020). Urban flood hazard mapping using a hydraulic–GIS combined model. *Natural Hazards*, 100(3), 1089–1104. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03850-7>
- Fernández-Pato, J., Martínez-Aranda, S., & García-Navarro, P. (2020). A 2D finite volume simulation tool to enable the assessment of combined hydrological and morphodynamical processes in mountain catchments. *Advances in Water Resources*, 141, 1–71. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103617>
- Fernández-Pato, J., Sánchez, A., & García-Navarro, P. (2019). Simulación de avenidas mediante un modelo hidráulico/hidrológico distribuido en un tramo urbano del río Ginel (Fuentes de Ebro). *Ribagua*, 6(1), 49–62. <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1622473>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J. L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Flick, R. E., Chadwick, D. B., Briscoe, J., & Harper, K. C. (2012). “Flooding” versus “Inundation.” *Eos*, 93(38), 365–366. <https://doi.org/10.1029/2012EO380009>
- Forgiarini, F. R., Souza, C. F., Silveira, A. L., Silveira, G., & Tucci, C. E. M. (2007). Avaliação de Cenários de Cobrança pela drenagem urbana de águas pluviais. *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 1–20.
- García, L., Barreiro-Gomez, J., Escobar, E., Téllez, D., Quijano, N., & Ocampo-Martinez, C. (2015). Modeling and real-time control of urban drainage systems: A review. *Advances in Water Resources*, 85(18), 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.08.007>
- Garrote, J., Alvarenga, F. M., & Díez-Herrero, A. (2016). Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage–damage functions and 2-D hydraulic models. *Journal of Hydrology*, 541, 611–625. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.006>
- Gaume, E., Borga, M., Llassat, M. C., Maouche, S., Gaume, E., Borga, M., Llassat, M. C., Maouche, S., & Lang, M. (2016). Mediterranean extreme floods and flash floods To cite this version : *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*, 133–144.
- Ghostine, R., Hoteit, I., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A., & Mose, R. (2015). Comparison between a coupled 1D–2D model and a fully 2D model for supercritical flow simulation in crossroads. *Journal of Hydraulic Research*, 53(2), 274–281.

<https://doi.org/10.1080/00221686.2014.974081>

- Globo. (2020a). *Chuva forte provoca alagamentos e transborda córregos na cidade de São Paulo nesta terça.* <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2020/12/29/chuva-deixa-zonas-leste-e-sul-de-sp-em-estado-de-atencao-para-alagamentos-nesta-terca-feira.ghtml>
- Globo. (2020b). *No Title Casa é atingida por enchente e chuva causa prejuízos a moradores em Campo Belo, MG.* <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2020/12/06/casas-sao-atingidas-por-enchente-e-moradores-tem-prejuizos-em-campo-belo-mg.ghtml>
- Grimaldi, S., Schumann, G. J. P., Shokri, A., Walker, J. P., & Pauwels, V. R. N. (2019). Challenges, Opportunities, and Pitfalls for Global Coupled Hydrologic-Hydraulic Modeling of Floods. *Water Resources Research*, 55(7), 5277–5300. <https://doi.org/10.1029/2018WR024289>
- Guo, J. C. Y., Wang, W. L., & Li, J. Q. (2020). Cascading Flow System for Urban Drainage Design. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(7), 04020030. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001945](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001945)
- Hasan, H. H., Razali, S. F. M., Zaki, A. Z. I. A., & Hamzah, F. M. (2019). Integrated hydrological-hydraulic model for flood simulation in tropical urban catchment. *Sustainability (Switzerland)*, 11(23), 1–24. <https://doi.org/10.3390/su11236700>
- Hossain, S., Hewa, G. A., & Wella-Hewage, S. (2019). A comparison of continuous and event-based rainfall-runoff (RR) modelling using EPA-SWMM. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030611>
- Huizinga, J., de Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). Global flood depth-damage functions. In *Joint Research Centre (JRC)*. <https://doi.org/10.2760/16510>
- Iber. (2014). *Iber: 2D modelling of free surface shallow water flow.* 1–417. [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/HEC-RAS\\_4.1\\_Reference\\_Manual.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf)
- INE. (2021). *Plataforma de divulgação dos Censos 2021.* [https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=censos21\\_main&xpid=CENSOS21&xlang=pt](https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=censos21_main&xpid=CENSOS21&xlang=pt)
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Isidoro, Jorge M.G.P., Rodrigues, J. I. J., Martins, J. M. R., & De Lima, J. L. M. P. (2010). Evolution of urbanization in a small urban basin: DTM construction for hydrologic computation. *IAHS-AISH Publication*, 336(April 2009), 109–114.
- Isidoro, Jorge Manuel Guieiro Pereira. (2012). *Modelling the influence of storm movement and wind-driven rainfall on overland flow in urban areas.*
- Jonov, C. M. P., Nascimento, N. de O., & Silva, A. de P. e. (2013). Avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtenção dos custos de recuperação TT - Evaluation of flood damage on buildings and calculation of recovery costs. *Ambiente Construído*, 13(1), 75–94. [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-)

86212013000100006&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.br/pdf/ac/v13n1/v13n1a06.pdf

- Kelman, I., & Spence, R. (2004). An overview of flood actions on buildings. *Engineering Geology*, 73(3–4), 297–309. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.010>
- Kim, B., Sanders, B. F., Schubert, J. E., & Famiglietti, J. S. (2014). Mesh type tradeoffs in 2D hydrodynamic modeling of flooding with a Godunov-based flow solver. *Advances in Water Resources*, 68, 42–61. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.02.013>
- La Loggia, G., Puleo, V., & Freni, G. (2020). Floodability: A New Paradigm for Designing Urban Drainage and Achieving Sustainable Urban Growth. *Water Resources Management*, 34(10), 3411–3424. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02620-6>
- Lonetti, P., & Maletta, R. (2018). Dynamic impact analysis of masonry buildings subjected to flood actions. *Engineering Structures*, 167(January 2017), 445–458. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.076>
- Lusa, A. (2020). *Mau tempo. Inundações no Algarve afetam sobretudo Olhão, Loulé, Silves e Albufeira*. <https://observador.pt/2020/11/30/mau-tempo-inundacoes-no-algarve-afetam-sobretudo-olhao-loule-silves-e-albufeira/>
- Machado, M. L., Nascimento, N., Baptista, M., Gonçalves, M., Silva, A., Lima, J. C., Dias, R., & Silva, A. (2005). Versus Profundidade De Submersão : Desenvolvimento De Metodologia. *Revista de Gestão de Água Da América Latina*, 2, 35–52.
- Marques, A. S., Lima, J. P., Sousa, J., Simões, N. E., & Pina, R. (2013). Hidrologia urbana - Sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas. In *Série Cursos Técnicos*.
- Martins, R., Leandro, J., Chen, A. S., & Djordjević, S. (2017). A comparison of three dual drainage models: Shallow water vs local inertial vs diffusive wave. *Journal of Hydroinformatics*, 19(3), 331–348. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.075>
- Martins, R., Leandro, J., & Djordjević, S. (2016). Influence of sewer network models on urban flood damage assessment based on coupled 1D/2D models. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S717–S728. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12244>
- McGrath, H., Abo El Ezz, A., & Nastev, M. (2019). Probabilistic depth–damage curves for assessment of flood-induced building losses. *Natural Hazards*, 97(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03622-3>
- Merz, B., Kreibich, H., Thielen, A., Schmidtke, R., & Hydrology, S. E. (2004). Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings\_Merz et al\_2004.pdf. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 153–163. <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/4/153/2004/nhess-4-153-2004.pdf>
- Metsul. (2021). *ENCHENTES CATASTRÓFICAS NA EUROPA*. <https://metsul.com/enchentes-catastroficas-na-europa/>
- Miguez, M. G., Battamarco, B. P., De Sousa, M. M., Rezende, O. M., Veról, A. P., & Gusmaroli, G. (2017). Urban flood simulation using MODCEL-an alternative quasi-2D conceptual model. *Water (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/w9060445>
- Monte, B. E. O., Costa, D. D., Chaves, M. B., de Oliveira Magalhães, L., & Uvo, C. B.

- (2016). Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1), 152–167. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p152-167>
- Moreira, P. R. C. (2016). *Medidas de reabilitação urbana em áreas de risco de cheia*. <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/18529>
- Ngamalieu-Nengoue, U. A., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., Mora-Meliá, D., & Valderrama, J. G. S. (2019). Urban drainage network rehabilitation considering storm tank installation and pipe substitution. *Water (Switzerland)*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030515>
- Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Sanders, B., Koren, V., Cui, Z., & Smith, M. (2016). A high resolution coupled hydrologic–hydraulic model (HiResFlood-UCI) for flash flood modeling. *Journal of Hydrology*, 541, 401–420. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.047>
- Noh, S. J., Lee, J. H., Lee, S., Kawaike, K., & Seo, D. J. (2018). Hyper-resolution 1D-2D urban flood modelling using LiDAR data and hybrid parallelization. *Environmental Modelling and Software*, 103, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.008>
- Pachaly, R. L., Vasconcelos, J. G., Allasia, D. G., & Bocchi, J. P. P. (2021). Evaluating SWMM capabilities to simulate closed pipe transients. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1866695>
- Papaoannou, G., Efstratiadis, A., Vasiliades, L., Loukas, A., Papalexou, S. M., Koukouvinos, A., Tsoukalas, I., & Kossieris, P. (2018). An operational method for Flood Directive implementation in ungauged urban areas. *Hydrology*, 5(2), 1–23. <https://doi.org/10.3390/hydrology5020024>
- Pato, J. H. (2011). *História das políticas públicas de abastecimento e saneamento de águas em Portugal*.
- Pistrika, A., Tsakiris, G., & Nalbantis, I. (2014). Flood Depth-Damage Functions for Built Environment. *Environmental Processes*, 1(4), 553–572. <https://doi.org/10.1007/s40710-014-0038-2>
- PONTES, P., Collischonn, W., FAN, F., Paiva, R., & Buarque, D. (2015). Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões / Hydrologic and hydraulic large-scale modeling with inertial flow routing. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(4), 888–904. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p888-904>
- Portela, M. M. (2006). Modelação hidrológica - Texto de apoio a disciplina de modelação e planeamento de recursos hídricos. *Instituto Superior Técnico*.
- Portugal, T. de. (2019). *Indicadores do turismo no Algarve*. <https://www.turismoalgarve.pt/pt/menu/545/publicacoes.aspx>
- Press, A. (2008). *Flooding could follow snow, ice in Midwest*. <https://www.deseret.com/2008/12/28/20293514/flooding-could-follow-snow-ice-in-midwest>
- Ramos. (2017). *DEPARTAMENTO DE ESTUDOS PÓS-GRADUADOS DISTRIBUIÇÃO DAS BASES AÉREAS CAP / ENGAED Rui João Santos Campos e Ramos Trabalho*

- Ramos, C. (2013). Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações. *E-LP Engineering and Technology Journal*, 4, 11–16. <http://revistas.ulusofona.pt/index.php/revistae-lp/article/view/3320>
- Rodrigues, S. P. C. (2017). *Aplicação de metodologias SIG à avaliação da perigosidade de inundação fluvial*. Escola Superior de Tecnologia de Tomar.
- Rodríguez, S. O., Onofl, C., Maksimović<sup>1</sup>, and Č., Li-Pen Wang<sup>1, 2</sup>, Willems<sup>2</sup>, P., Assel<sup>3</sup>, J. Van, Auguste, Gires<sup>4</sup>, , Abdella Ichiba<sup>4, 5</sup>, Bruni<sup>6</sup>, G., & Veldhuis, and M.-C. ten. (2015). Urban pluvial flood modelling: current theory and practice. Review document related to Work Package 3 – Action 13. *Journal of Hydrology*, 13(2), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.010><http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006><http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2015.1041991><http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1911><https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-adaptation-a>
- RTP. (1989). *No Title Temporal no Algarve*. <https://arquivos.rtp.pt/conteudos/temporal-no-algarve/>
- Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2020). Modelling pluvial flooding in urban areas coupling the models iber and SWMM. *Water (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/w12092647>
- Saraiva, M. G. da, & Carvalho, L. (2009). *RISCO DE INUNDACAO-"Metodologia para formulacao do indicador ripocity n 4"*. 1–19.
- Schroeder, A. J., Gourley, J. J., Hardy, J., Henderson, J. J., Parhi, P., Rahmani, V., Reed, K. A., Schumacher, R. S., Smith, B. K., & Taraldsen, M. J. (2016). The development of a flash flood severity index. *Journal of Hydrology*, 541, 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.005>
- Seibert, J., Vis, M., Lewis, E., & Meerveld, I. Van. (2019). *Seibert J , Vis MJP , Lewis E , Meerveld HJ . Upper and lower benchmarks in hydrological modeling*. 32(February), 1120–1125.
- Silva, T. (2017). Concepção e dimensionamento de sistema de drenagem urbana em zona comercial do município de lagoa da prata - MG. In *Occupational Medicine* (Vol. 53, Issue 4).
- Simões, N., Wang, L., & Leitao, X. (2011). *Modelos de drenagem dual para previsão de cheias urbanas*. 1–10.
- Taji, S. G., & Regulwar, D. G. (2019). LID coupled design of drainage model using GIS and SWMM. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(1), 376–389. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1660919>
- Teng, J., Jakeman, A. J., Vaze, J., Croke, B. F. W., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- The international Disaster Data Base (EM-DAT). (n.d.). *No Title*. <https://www.emdat.be/>

- UNFCCC. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change United Nations. *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1–33.
- USEPA. (2005). *National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas*. 518.
- USP, U. de S. P. (2022). *IPCC relata que as mudanças climáticas são reais – Conheça as principais conclusões do relatório*. <https://www.ecodebate.com.br/2021/08/10/ipcc-relata-que-as-mudancas-climaticas-sao-reais-conheca-as-principais-conclusoes-do-relatorio/>
- Velasco, M., Cabello, À., & Russo, B. (2016). Flood damage assessment in urban areas. Application to the Raval district of Barcelona using synthetic depth damage curves. *Urban Water Journal*, 13(4), 426–440. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.994005>
- Willner, S. N., Otto, C., & Levermann, A. (2018). Global economic response to river floods. *Nature Climate Change*, 8(7), 594–598. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0173-2>
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2015). The SuDS Manual. In *Ciria C697*.
- Xiao, S., Li, N., & Guo, X. (2021). Analysis of flood impacts on masonry structures and mitigation measures. *Journal of Flood Risk Management*, 14(4), 1–19. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12743>
- Zeng, S., Guo, H., & Dong, X. (2019). Understanding the synergistic effect between LID facility and drainage network: With a comprehensive perspective. *Journal of Environmental Management*, 246(March), 849–859. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.028>

## **ANEXOS**



ANEXO A – Danos devido às profundidades obtidas com a modelação no SWMM.

Sub - bacia	Área (ha)	Profundidade de água (m)	Construções residenciais			Construções comerciais			Infraestruturas (ruas)		Transportes		Agriculturas	
			Ocupação (%)	Dano estrutural (€)	Dano não estrutural (€)	Ocupação (%)	Dano estrutural (€)	Dano não estrutural (€)	Ocupação (%)	Dano total (€)	Ocupação (%)	Dano total (€)	Ocupação (%)	Dano total (€)
A	218,4	0,35	0	-	-	0	-	-	0	-	0	-	100	44.305,68
B	17,8	0,35	0	-	-	95	8.091.435,0	8.091.435,0	5	20.938,1	5	767.536,0	0	-
C	16,6	0,52	70	12.417.132,0	6.193.460,0	0	-	-	30	169.230,4	30	6.442.128,0	0	-
D	20,1	0,52	80	17.165.990,4	8.562.112,0	0	-	-	20	136.471,7	20	5.195.097,6	0	-
E	94,4	0,25	0	-	-	0	-	-	0	-	0	-	100	13.674,54
F	7,9	0,46	60	4.492.065,6	2.240.568,0	30	1.446.984,0	1.446.984,0	10	24.650,0	10	932.176,0	0	-
G	5,4	0,83	70	5.477.808,0	2.732.240,0	0	-	-	30	76.788,9	30	3.006.796,8	0	-
H	8,4	0,13	0	-	-	50	713.378,3	713.378,3	10	7.144,7	10	271.429,9	40	259,98
I	2,4	0,46	80	1.845.225,6	920.368,0	0	-	-	20	14.669,8	20	557.309,0	0	-
J	7,1	0,48	5	351.651,6	175.398,0	0	-	-	5	11.182,7	5	424.833,9	90	1.797,70
K	6,5	0,39	100	5.367.660,0	2.677.300,0	0	-	-	-	-	0	-	0	-
L	4,3	0,17	60	947.683,8	472.689,0	30	284.189,9	284.189,9	10	4.743,8	10	180.216,8	0	-
M	9,4	0,27	90	4.880.542,8	2.434.334,0	0	-	-	10	16.550,5	10	628.760,2	0	-
N	5,0	0,48	0	-	-	20	620.136,0	620.136,0	10	15.527,2	10	589.881,6	60	832,04
O	3,6	0,48	0	-	-	20	453.513,6	453.513,6	0	-	0	-	80	811,30
P	16,5	0,28	0	-	-	0	-	-	0	-	0	-	100	2.716,26
Q	11,2	0,28	70	4.490.997,0	2.240.035,0	10	407.421,0	407.421,0	10	21.225,7	10	806.370,1	0	-
R	7,2	0,29	80	3.546.108,0	1.768.740,0	0	-	-	20	27.252,3	20	1.035.321,7	0	-
S	5,5	0,24	50	1.358.766,0	677.730,0	20	345.146,4	345.146,4	30	25.925,7	30	984.923,5	0	-
T	9,4	0,35	50	3.487.417,2	1.739.466,0	30	1.292.145,8	1.292.145,8	20	43.160,4	20	1.639.677,2	0	-
U	1,3	0,48	0	-	-	90	721.612,8	721.612,8	10	4.015,1	10	152.535,0	0	-
			<b>Total</b>	65.829.048,00	32.834.440,00		14.375.962,65	14.375.962,65		619.476,83		23.614.993,36		64.397,50
			<b>Geral</b>	151.714.280,99										

ANEXO B – Danos devido às profundidades obtidas com a modelação no Iber.

Sub - bacia	Área (ha)	Profundidade de água (m)	Construções residenciais			Construções comerciais			Infraestruturas (ruas)		Transportes		Agriculturas	
			Ocupação (%)	Dano estrutural (€)	Dano não estrutural (€)	Ocupação (%)	Dano estrutural (€)	Dano não estrutural (€)	Ocupação (%)	Dano total (€)	Ocupação (%)	Dano total (€)	Ocupação (%)	Dano total (€)
A	218,4	0,21	0	-	-	0	-	-	0	-	0	-	100	26.583,4
B	17,8	0,08	0	-	-	95	1.765.404,0	1.765.404,0	5	4.652,9	5	176.765,9	0	-
C	16,6	0,12	70	2.865.492,0	1.429.260,0	0	-	-	30	39.053,2	30	1.483.641,6	0	-
D	20,1	0,15	80	5.281.843,2	2.634.496,0	0	-	-	20	39.366,8	20	1.495.558,4	0	-
E	94,4	0,20	0	-	-	0	-	-	0	-	0	-	100	10.939,6
F	7,9	0,41	60	4.101.451,2	2.045.736,0	30	1.271.278,8	1.271.278,8	10	21.970,7	10	834.672,5	0	-
G	5,4	0,09	70	782.544,0	390.320,0	0	-	-	30	9.598,6	30	364.654,1	0	-
H	8,4	0,01	0	-	-	50	65.850,3	65.850,3	10	659,5	10	25.055,1	40	23,4
I	2,4	0,17	80	722.044,8	360.144,0	0	-	-	20	5.421,4	20	205.962,0	0	-
J	7,1	0,43	5	322.347,3	160.781,5	0	-	-	5	10.017,8	5	380.580,4	90	1.599,3
K	6,5	0,27	100	3.757.362,0	1.874.110,0	0	-	-	0	-	0	-	0	-
L	4,3	0,01	60	105.298,2	52.521,0	30	23.403,9	23.403,9	10	390,7	10	14.841,4	0	-
M	9,4	0,11	90	2.091.661,2	1.043.286,0	0	-	-	10	6.742,8	10	256.161,5	0	-
N	5,0	0,15	0	-	-	20	193.792,5	193.792,5	10	4.852,2	10	184.338,0	60	258,2
O	3,6	0,15	0	-	-	20	141.723,0	141.723,0	0	-	0	-	80	251,8
P	16,5	0,23	0	-	-	0	-	-	0	-	0	-	100	€ 2.205,0
Q	11,2	0,16	70	2.566.284,0	1.280.020,0	10	232.812,0	232.812,0	10	12.129,0	10	460.782,9	0	-
R	7,2	0,04	80	472.814,4	235.832,0	0	-	-	20	3.758,9	20	142.803,0	0	-
S	5,5	0,16	50	905.844,0	451.820,0	20	230.097,6	230.097,6	30	17.283,8	30	656.615,7	0	-
T	9,4	0,18	50	1.743.708,6	869.733,0	30	664.532,1	664.532,1	20	22.196,8	20	843.262,6	0	-
U	1,3	0,18	0	-	-	90	270.604,8	270.604,8	10	1.505,7	10	57.200,6	0	-
			<b>Total</b>	25.718.694,90	12.828.059,50		4.859.498,97	4.859.498,97		199.600,79		7.582.895,69		41.860,74
			<b>Geral</b>	56.090.109,56										