



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Zonas inundáveis e quantificação do risco de inundação em meios urbanos

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

Autor

Telmo José Alves Gomes de Paula

Orientador

Nuno Eduardo da Cruz Simões

José Alfeu Almeida de Sá Marques

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e ao Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques, meus orientadores, pela disponibilidade e por todo o apoio e partilha de conhecimentos, cuja qualidade é indispensável a qualquer trabalho deste âmbito.

Aos meus pais e ao meu irmão por todo o apoio, esforço, dedicação e motivação que me deram ao longo não só do meu percurso académico como também de toda a minha vida.

À minha namorada, Inês, pelo amor, apoio constante, incentivo e ajuda ao longo dos últimos nove anos.

À minha família e aos meus amigos e colegas que me acompanharam ao longo da minha formação e sem os quais teria sido, com certeza, bem mais difícil.

RESUMO

As inundações urbanas são hoje em dia um assunto preocupante um pouco por todo o Mundo. Os danos por elas causados são muitas vezes bastante graves, e por isso é necessário implementar medidas preventivas para mitigar este problema.

A cada vez maior urbanização de espaços que anteriormente apresentavam superfícies mais permeáveis e também as alterações climáticas que se têm vindo a registar ao longo dos últimos anos têm um forte impacto no que respeita ao acontecimento de inundações. Muitas vezes os sistemas de drenagem não se encontram preparados para o aumento de caudal provocado por estes fenómenos, resultando daí inundações.

Associados às preocupações inerentes às inundações surgem os mapas de risco, que classificam determinada zona consoante as consequências sofridas quando atingida por uma inundação e a probabilidade de ocorrência dessa inundação. Em 2007 a União Europeia publicou a Diretiva 2007/60/CE que prevê precisamente que todos os Estados-Membros devem elaborar mapas de risco de inundação.

Este trabalho tem como objetivo, no seguimento dos fatores apresentados, a modelação de um sistema de drenagem dual 1D/1D através da utilização do *software* SWMM, o controlo da entrada e saída de caudal entre os coletores e a superfície e a elaboração de mapas de zonas inundáveis e mapas de risco de inundação para a Zona Central de Coimbra. Para isso, simularam-se chuvadas com determinado período de retorno e, com base nos resultados, elaboraram-se os referidos mapas.

Com o trabalho concluiu-se ser possível a modelação de sistemas de drenagem dual no *software* SWMM, controlando igualmente as trocas de caudal entre a superfície e os coletores. Através da elaboração dos mapas de zonas inundáveis e dos mapas de risco verificou-se que, apesar das limitações próprias do estudo realizado, estes davam uma indicação clara de quais as zonas e os edifícios mais sujeitos a sofrerem maiores prejuízos em caso de inundação.

ABSTRACT

Urban floods are currently a problem all over the world. The damage can be enormous, thus it is necessary to implement preventive measures to mitigate this problem.

The increasing urbanization of permeable surfaces and the climate changes can lead to the occurrence of flooding. Drainage systems may not be prepared to the increasing of flow caused by these phenomena, therefore flooding may occur.

Flood risk maps are used to classify the likelihood of flooding and quantify its consequence. In 2007 the European Union issued Directive 2007/60/CE, that requires Member States to assess if there are risk of flooding.

The goals of this thesis are to model a 1D/1D dual drainage system using SWMM, control input and output flow between the surface and the sewer systems, create maps of floodable areas and flood risk maps for the Zona Central catchment in Coimbra. In order to achieve these objectives, precipitation events with different return periods were simulated and, based on the results obtained, flood risk maps were created.

In this thesis was shown how to model dual drainage systems and control input and output flow between surface and sewer systems in SWMM. Flood risk maps gave a clear indication about what areas and buildings are most likely to suffer considerable damages in case of flooding.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Introdução	4
2.2	Drenagem Urbana	4
2.3	Impacto da Urbanização	8
2.4	Modelação Hidrológica/Hidráulica.....	10
2.4.1	Introdução	10
2.4.2	Precipitação	12
2.4.3	Modelos Hidrológicos	13
2.4.4	Modelos Hidráulicos	15
2.4.5	Delineação da rede superficial – Ferramenta AOFD.....	19
2.4.6	O Software SWMM.....	21
2.5	Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Drenagem Urbana	22
2.6	Modelos digitais de terreno.....	23
2.7	Gestão do risco de inundação	24
2.8	Mapas de Zonas Inundáveis e Mapas de Risco	25
3	METODOLOGIA	29
3.1	Introdução	29
3.2	Metodologia para a elaboração de mapas de zonas inundáveis.....	29
3.2.1	Introdução	29
3.2.2	Precipitação	29
3.2.3	Modelação hidrológica/hidráulica	31
3.2.4	Rede de Drenagem Dual.....	31

3.3	Metodologia para a classificação do risco	31
3.4	Caso de estudo	34
4	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	38
4.1	Introdução	38
4.2	Modelação de sistemas de drenagem dual	38
4.2.1	Exemplo 1 – Água na rede superficial, sem controlo da entrada de caudal nas várias caixas de visita.....	38
4.2.2	Exemplo 2 – Água na rede superficial, com controlo da entrada de caudal nas várias caixas de visita.....	40
4.2.3	Exemplo 3 – Água na rede de coletores, com controlo da saída de caudal em caso de sobrecarga.....	42
4.3	Aplicação do conceito de Drenagem Dual ao Caso de Estudo.....	44
4.3.1	Introdução.....	44
4.3.2	Mapas de zonas inundáveis	46
4.3.3	Mapas de risco de inundação.....	53
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Trabalhos Futuros	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Canal de escoamento em Mohenjo-Daro, Paquistão (Burian et al., 1999)	5
Figura 2.2 – Inundação Urbana (University of Exeter, 2010).....	8
Figura 2.3 – Efeito da urbanização no caudal escoado (adaptado de Butler e Davies, 2011)....	9
Figura 2.4 – Exemplo de sobrecarga do sistema (adaptado de Balmforth et al., 2006)	10
Figura 2.5 – Relação entre as várias fases da modelação hidrológica e hidráulica (adaptado de Mark et al., 2004)	11
Figura 2.6 – Curva tempo-área de acordo com a área da bacia (Leitão et al., 2008)	14
Figura 2.7 – Modelo hidrológico usado pelo <i>software</i> SWMM.....	14
Figura 2.8 – Representação de uma sub-bacia usada pelo SWMM (adaptado de SWMM, 2013).....	15
Figura 2.9 – Fenda de Preissman (Sá Marques et al., 2013)	17
Figura 2.10 – Representação esquemática do conceito de drenagem dual (adaptado de Smith, 2006).....	18
Figura 2.11 – Tipos de caminhos superficiais gerados pela ferramenta AOFD (adaptado de Maksimovic et al., 2009)	20
Figura 2.12 – Fases do processo de criação da rede de drenagem dual (adaptado de Adeyemo, 2007).....	21
Figura 2.13 – Modelo LIDAR (Fonte: NRCS).....	23
Figura 2.14 – Exemplo de mapa de zonas inundáveis (Sá Marques et al., 2010)	26
Figura 2.15 – Exemplo de matriz de risco (adaptado de ERM Risk and Safety).....	27
Figura 2.16 – Exemplo de mapa de risco de inundação (adaptado de Environment Agency – UK)	28
Figura 3.1 – Precipitação para Tr de 20 anos	30
Figura 3.2 – Precipitação para Tr de 100 anos	30
Figura 3.3 – Relação entre a altura de água e o custo dos danos (adaptado de Penning-RowSELL, em Leitão, 2009).....	32
Figura 3.4 – Curva de custo dos danos.....	33
Figura 3.5 – Localização da cidade de Coimbra em Portugal	34
Figura 3.6 – Zona central de Coimbra. A zona a vermelho mostra a área crítica desta bacia..	35
Figura 3.7 – Modelo digital de terreno (à esq.), carta de declives (ao centro) e carta de orientações (à dir.)	35
Figura 3.8 – Modelo Digital de Terreno (+ edificação)	36
Figura 3.9 – Praça 8 de Maio na cheia de 09/06/2006	36

Figura 3.10 – Praça 8 de Maio na cheia de 21/09/2008	37
Figura 4.1 – Esquema do modelo simplificado inicial	39
Figura 4.2 – Resultados obtidos através do modelo simplificado inicial	40
Figura 4.3 – Modelo simplificado com “outlets” de controlo de entrada.....	40
Figura 4.4 – Relação entre caudal (Q) e altura de água (h)	41
Figura 4.5 – Resultados do modelo simplificado com “outlets” de controlo de entrada	42
Figura 4.6 – Modelo simplificado com “outlets” de controlo de saída	42
Figura 4.7 – Resultados do modelo simplificado com “outlets” de controlo de saída	43
Figura 4.8 – Modelo simplificado final	43
Figura 4.9 – Representação em planta de um trecho da rede final no SWMM´	44
Figura 4.10 – Caudal junto à praça 8 de Maio.....	45
Figura 4.11 – Caudal junto à Praça da República.....	45
Figura 4.12 – Edifícios presentes na zona crítica da zona em estudo	46
Figura 4.13 – Edifícios e zonas de acumulação de água na área em estudo	47
Figura 4.14 – Edifícios e zonas de acumulação de água na área crítica.....	47
Figura 4.15 – Interseções das zonas de acumulação de água com os edifícios.....	48
Figura 4.16 – Mapa de zonas inundáveis (Tr de 20 anos).....	50
Figura 4.17 – Mapa de zonas inundáveis (Tr de 100 anos).....	51
Figura 4.18 – Edifícios cuja classe de risco modificou de acordo com os resultados para Tr de 20 e de 100 anos	52
Figura 4.19 – Mapa de risco de inundação, expresso em €/m ² (Tr de 20 anos).....	54
Figura 4.20 – Mapa de risco de inundação, expresso em €/m ² (Tr de 100 anos).....	55
Figura 4.21 – Mapa de risco de inundação, expresso em € (Tr de 20 anos)	56
Figura 4.22 – Mapa de risco de inundação, expresso em € (Tr de 100 anos)	57

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Características da modelação 1D/1D e 1D/2D.....	19
Quadro 4.1 – Curva de vazão implantada nos “outlets”	41

ABREVIATURAS

AOFD – *Automatic Overland Flow Delineation*

EPA – *Environmental Protection Agency*

InSAR – *Interferometric Synthetic Aperture Radar*

LIDAR – *Light Detection And Ranging*

PIB – Produto Interno Bruto

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SUDS – Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável

SWMM – *Storm Water Management Model*

Tc – Tempo de Concentração

Tr – Período de Retorno

UNISDR – Gabinete das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres

SIMBOLOGIA

A – Área

C – Coeficiente de Impermeabilização

g – Aceleração Gravítica

h – Altura do Escoamento

I – Intensidade de Precipitação

Q – Caudal

S_0 – Declive do Canal

S_{0x} – Declive do Canal na Direção “x”

S_{0y} – Declive do Canal na Direção “y”

S_f – Função do Atrito

S_{fx} – Função do Atrito na Direção “x”

S_{fy} – Função do Atrito na Direção “y”

t – Tempo

u – Velocidade na Direção “x”

v – Velocidade na Direção “y”

x – Direção Principal do Escoamento

y – Direção do Escoamento Perpendicular a “x”

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A Diretiva 2007/60/CE, criada em Outubro de 2007, enfatiza as inundações e os problemas que estas podem criar para a população. Estas são fenómenos que não podem ser controlados e portanto é importante prevenir as Comunidades o melhor possível para que estejam preparadas e protegidas em caso de inundação. Existem, segundo o definido na Diretiva, quatro tipos de inundação, nomeadamente as cheias de origem fluvial, as cheias repentinas, as inundações urbanas e as inundações marítimas em zonas costeiras. Este trabalho foca-se sobre as inundações urbanas.

Algumas das principais causas que contribuem para o aumento da ocorrência de inundações urbanas são o aumento da percentagem de áreas impermeáveis, que conseqüentemente aumentam o caudal escoado, e as alterações dos cursos de água naturais e dos sistemas de drenagem existentes, que aumentam as alturas de escoamento.

As alterações climáticas podem, também, ter alguma influência na gestão das infraestruturas de drenagem. Nos últimos anos têm sido mais frequentes eventos climatéricos extremos, tais como chuvadas intensas (Furumai e Matsuura, em Leitão (2009)). Com a ocorrência de uma forte chuvada os sistemas de drenagem existentes podem não se encontrar dimensionados para a impermeabilização atual da área (Pedroso de Lima, 2013a), e desse modo tendem a não conseguir escoar o caudal necessário. Isto faz com que a água saia do sistema de drenagem e passe a ser escoada à superfície, podendo assim gerar inundações.

Criar sistemas de drenagem adaptáveis é, portanto, uma preocupação bastante atual. Eles são importantes para escoar as águas residuais e as águas pluviais de forma eficiente, prevenindo deste modo não só inundações como também ajudando na manutenção da segurança e da saúde pública (Butler e Davies, 2011).

Na sequência desta necessidade surgem os mapas de risco, que classificam as zonas de acordo com a probabilidade em inundarem e com as conseqüências daí resultantes. A Diretiva 2007/60/CE prevê a necessidade da elaboração deste tipo de mapas em todos os Estados-Membros, sendo por isso importante a sua realização.

A modelação matemática da drenagem urbana é bastante importante para que se possa saber de forma mais correta como dimensionar/gerir um sistema de drenagem. Recorrendo aos

modelos de simulação é possível simular vários cenários e daí tirar ilações que são importantes para a referida gestão dos sistemas de drenagem.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Modelação hidrológica/hidráulica duma bacia urbana com um sistema de drenagem dual 1D/1D;
- Implementação duma rede de drenagem dual 1D/1D com recurso ao *software* Storm Water Management Model (SWMM);
- Controlo da entrada de caudal nos coletores a partir da superfície e da saída de caudal para a superfície, quando os coletores entram em carga (interação entre o sistema principal e o sistema secundário);
- Elaboração de mapas de zonas inundáveis;
- Quantificação do risco de inundação de uma determinada zona urbana através da elaboração dos correspondentes mapas de risco de inundação.

A zona sobre a qual incidirá o estudo será a zona central da cidade de Coimbra, junto à Câmara Municipal e à Igreja de Santa Cruz. Esta é uma área bastante propícia à ocorrência de inundações, como se descreverá posteriormente, pelo que é de grande interesse elaborar o referido estudo nesta zona.

Com recurso ao *software* Storm Water Management Model (SWMM), modela-se um sistema de drenagem dual, com controlo da entrada e saída de caudal entre os coletores e a superfície. Utilizando depois este sistema de drenagem fazem-se simulações computacionais com diferentes eventos pluviométricos associados a diferentes períodos de retorno, através das quais se obtêm resultados que permitem elaborar mapas de zonas inundáveis associados a diferentes probabilidades de ocorrência.

Com os resultados das zonas inundáveis são analisadas as suas consequências em termos de impactes diretos nas infraestruturas afetadas, sendo aplicada uma metodologia quantitativa na elaboração dos mapas de risco, metodologia essa que tenta quantificar com um valor monetário o dano direto provocado pelas inundações, consoante a altura de água atingida em cada edifício.

O objetivo final é ter mapas de zonas inundáveis e mapas de risco, que classificam cada infraestrutura consoante o grau de risco, em termos monetários, resultante de uma inundação.

1.3 Estrutura da Dissertação

No primeiro capítulo é feito o enquadramento do tema em estudo, com uma breve introdução às principais causas de inundações, aos mapas de risco e à modelação de sistemas de drenagem urbana. Neste capítulo apresentam-se ainda os objetivos da dissertação e a estrutura com que esta se organiza.

No segundo capítulo faz-se uma revisão bibliográfica, no qual se aborda, de forma breve, o conceito de drenagem urbana, a influência da urbanização no aumento de inundações, a modelação hidrológica/hidráulica, os Sistemas de Informação Geográfica e os modelos digitais de terreno, e se trata também a gestão do risco de inundação e o conceito de mapas de zonas inundáveis e de mapas de risco.

No terceiro capítulo apresentam-se as metodologias que serão usadas para a realização dos mapas de zonas de inundáveis e dos mapas de risco, bem como o caso de estudo.

No quarto capítulo são apresentados inicialmente alguns exemplos de aplicação e posteriormente é analisado em concreto o caso de estudo, sendo feita a apresentação e a discussão dos resultados.

No quinto e último capítulo são elaboradas as conclusões e são propostos alguns trabalhos que poderão eventualmente ser realizados posteriormente, dando continuidade ao trabalho desenvolvido nesta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Alguns dos principais fatores que influenciam a ocorrência de inundações são o mau funcionamento dos sistemas de drenagem e também o aumento da urbanização, algo que tem vindo a verificar-se ao longo das últimas décadas. As consequências de inundações podem ser medidas e poderão ser elaborados mapas de risco que tentam classificar as várias zonas atingidas por inundações consoante o grau de risco a que estão sujeitas.

Assim, neste capítulo abordam-se os conceitos de drenagem urbana, impacto da urbanização, modelação hidrológica/hidráulica, Sistemas de Informação Geográfica, modelos digitais de terreno e gestão do risco de inundação, fatores importantes na realização dos mapas de zonas inundáveis e dos mapas de risco, também abordados neste capítulo.

2.2 Drenagem Urbana

O principal objetivo da drenagem urbana é escoar a água resultante da precipitação para que esta não cause incómodos e/ou prejuízos aos habitantes e aos utilizadores dos serviços urbanos de um modo geral, através principalmente da prevenção de inundações. Os sistemas de drenagem urbana são importantes em áreas urbanas desenvolvidas devido à interação entre as atividades humanas e o ciclo natural da água (Butler e Davies, 2011).

Até à Idade Moderna as obras de drenagem não foram consideradas, regra geral, como infraestruturas necessárias e condicionantes ao crescimento e ao ordenamento das áreas urbanas. Existem, no entanto, registos de várias obras e intervenções realizadas nesse âmbito levadas a cabo por civilizações antigas (Matos, 2003). Segundo Matos (2003), as civilizações Hindu e Mesopotâmica, por exemplo, possuíam já infraestruturas de drenagem e saneamento, o que demonstra que mesmo os povos que pontificaram na Terra nos anos antes de Cristo, ou pelo menos alguns deles, já tinham preocupações com a drenagem, como é exemplo a Figura 2.1, que demonstra um canal de escoamento em Mohenjo-Daro, uma das mais importantes cidades primordiais da civilização Hindu.



Figura 2.1 – Canal de escoamento em Mohenjo-Daro, Paquistão (Burian et al., 1999)

A necessidade de criar obras de saneamento e de drenagem passa a ser uma maior preocupação a partir do século XVIII. O início do século XIX foi, aliás, marcado por um grande crescimento nesse mesmo âmbito (Matos, 2003). Burian et al. (1999) resumiu os principais avanços na drenagem urbana na Europa e nos Estados Unidos da América durante os séculos XIX e XX, e agrupou-os nas seguintes oito categorias:

- Identificação de doenças relacionadas com a água;
- Aperfeiçoamento dos materiais das condutas, do seu método de construção e práticas de manutenção;
- Sistema de transporte e remoção de resíduos;
- Sistemas separativos *versus* sistemas unitários de drenagem;
- Avanços na hidrologia urbana;
- Introdução ao tratamento de efluentes;
- Avanços computacionais;
- Sensibilização ambiental.

A drenagem urbana pode ser efetuada naturalmente ou através de redes de condutas construídas especialmente para esse fim. Ou seja, os sistemas de drenagem podem dividir-se em sistemas naturais e em sistemas artificiais/urbanos, constituídos por redes de coletores (Butler e Davies, 2011).

Os sistemas de drenagem urbana funcionam muitas vezes com o intuito de prevenir inundações, maioritariamente nas áreas de cota mais baixa das zonas urbanas, visto serem zonas propícias a inundar. Pode dizer-se então que a drenagem urbana tem uma tremenda importância visto que se relaciona de forma direta com a segurança e com o bem-estar dos seres humanos (Pedroso de Lima et al., 2013b).

Em termos humanos, o maior benefício de um sistema de drenagem é a manutenção da saúde pública (Butler e Davies, 2011). Eles são importantes na prevenção de doenças na medida em que, ao escoarem a água impedem que esta fique estagnada ou depositada, o que faz com que se desenvolvam, nessas condições, ambientes propícios ao aparecimento de doenças. Butler e Davies (2011) apontam exatamente isso no que diz respeito a países tropicais, onde as águas estagnadas geram condições favoráveis à criação de mosquitos e à propagação de doenças, como a malária.

Os sistemas de drenagem urbana podem, em zonas com baixa densidade populacional, ser bastante simples e, pelo contrário, em zonas cuja densidade populacional é elevada, ser bastante complexos, constituídos por redes bastante elaboradas e extensas de coletores e de outros equipamentos acessórios (Pedroso de Lima et al., 2013b).

Estes sistemas de drenagem dividem-se em quatro tipos diferentes, em função da origem das águas que escoam. Eles podem ser:

- Unitários (constituídos por uma rede de coletores única onde se juntam todas as águas residuais);
- Separativos (constituídos por duas redes de drenagem diferentes, separando as águas residuais domésticas das águas pluviais);
- Mistos (uma parte da rede é unitária e outra é separativa);
- Pseudo-separativos (devido à inexistência de coletores pluviais é permitida a ligação de águas pluviais de pátios interiores e terraços ao coletor de águas residuais domésticas).

O estudo aprofundado neste documento focar-se-á sobre o escoamento de águas pluviais, visto que o principal objetivo é a quantificação do risco de inundações. Deste modo, é de importância acrescida explicar o significado de inundação e de risco de inundação. Segundo a Diretiva 2007/60/CE, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações, uma inundação pode definir-se como a cobertura temporária por água de uma determinada área não coberta

normalmente por água. Quanto ao risco de inundação este pode definir-se como sendo a combinação entre a probabilidade de ocorrência de uma inundação e as potenciais consequências que dela resultem e que sejam, segundo a Diretiva 2007/60/CE “...prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as atividades económicas.”

Existem, ainda, vários tipos de inundações. Estas podem ser classificadas em quatro tipos diferentes, segundo o descrito na Diretiva referida anteriormente:

- Cheias de origem fluvial;
- Cheias repentinas;
- Inundações urbanas;
- Inundações marítimas em zonas costeiras.

As cheias de origem fluvial ocorrem quando a água de um rio galga as suas margens, como foi exemplo as cheias em Montemor-o-Velho em 2001.

Cheias repentinas dão-se quando se verifica um evento de precipitação forte em zonas com tempo de concentração curto, como por exemplo em zonas montanhosas.

As inundações urbanas, tal como a representada na Figura 2.2, são uma consequência da urbanização, da falta de manutenção dos sistemas de captação de água e, muitas vezes, do facto dos sistemas de drenagem se encontrarem obsoletos, não dando a resposta necessária ao escoamento de água.

As inundações marítimas em zonas costeiras dão-se quando há temporais, principalmente com as marés vivas ou até com *tsunamis*, alagando as zonas junto à costa, como foi exemplo as cheias devido ao *tsunami* no Japão em 2011.

O tipo de inundações tratado neste estudo são as inundações urbanas, visto a zona em estudo se tratar de uma área urbana.



Figura 2.2 – Inundação Urbana (University of Exeter, 2010)

Por vezes há interação entre os vários tipos de cheia, como por exemplo uma cheia de origem fluvial que se alarga para dentro da área urbana, e por sua vez não permite o escoamento do sistema de drenagem, provocando uma inundação urbana.

2.3 Impacto da Urbanização

As inundações são um evento frequente e têm cada vez mais tendência a aumentar devido não só às alterações climáticas espectáveis como também devido ao aumento de urbanização (Leitão et al., 2012).

Já desde o tempo dos Romanos que se verificam problemas de drenagem devido à construção de infraestruturas que impermeabilizam o solo. Nos últimos dois séculos os países desenvolvidos têm, no entanto, vindo a desenvolver infraestruturas que visam a drenagem eficiente das águas não só escoadas pelos coletores como também as de escoamento superficial (Balmforth et al., 2006).

O desenvolvimento das áreas urbanas e, conseqüentemente, o aumento da densidade populacional nessas áreas, associado ao inadequado planeamento dos sistemas de drenagem, leva ao aumento do caudal escoado devido à maior impermeabilização do solo provocada pela construção de edifícios e arruamentos.

O aumento do escoamento superficial faz com que aumente o caudal que chega aos cursos de água onde estes se depositam. Este escoamento dá-se mais rapidamente sobre superfícies urbanizadas do que sobre terrenos naturais, pelo que se atingem caudais de pico maiores nestas condições. Apresenta-se de seguida a Figura 2.3, proposta por Butler e Davies (2011), onde se evidencia o referido efeito da urbanização nos caudais escoados.

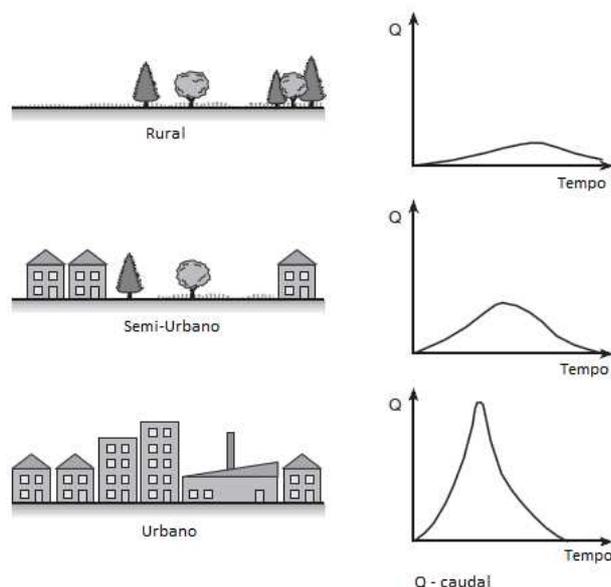


Figura 2.3 – Efeito da urbanização no caudal escoado (adaptado de Butler e Davies, 2011)

No hidrograma superior, referente a uma zona rural, percebe-se que o caudal de ponta numa zona com essas características é bastante baixo e próximo do caudal médio. Isto deve-se maioritariamente ao facto da zona rural ser rica em vegetação, o que faz com que os níveis de infiltração sejam altos. No hidrograma intermédio já se começa a perceber o efeito da urbanização no caudal, sendo o pico já um valor superior ao anterior. Por fim, no último dos diagramas apresentados o caudal de ponta toma já um valor elevadíssimo quando comparado com o dos restantes hidrogramas. Facilmente se explica este facto quando se sabe que este hidrograma corresponde a uma zona urbanizada. As superfícies nestas áreas são em grande parte impermeáveis, o que faz com que a percentagem de água que se infiltra no solo seja bastante pequena, aumentando assim o volume de água escoado superficialmente.

Em áreas urbanas é também comum a existência de inundações localizadas. Estas podem dar-se em zonas onde a secção de escoamento é limitada devido ao estreitamento do curso de água. O aumento de infraestruturas viárias que se verifica em zonas urbanas aumenta também a área impermeável do solo, contribuindo para a sobrecarga do sistema, fator salientado no parágrafo seguinte (Pedroso de Lima et al., 2013b).

Tendo em consideração todos os aspetos até aqui referidos pode-se concluir que a expansão urbana, principalmente em zonas cuja ocupação do solo era anteriormente composta por áreas florestais e agrícolas, tem fomentado uma alteração no ciclo natural da água. Isto faz com que algumas redes de drenagem pluvial tenham um comportamento hidráulico deficiente, devido

ao atual subdimensionamento em que se encontram. Deste modo, os coletores podem entrar em carga (ver Figura 2.4) e dão-se inundações, principalmente nos pontos baixos das bacias hidrográficas que é onde se situam muitas vezes as zonas urbanas (Pedroso de Lima et al., 2013b).

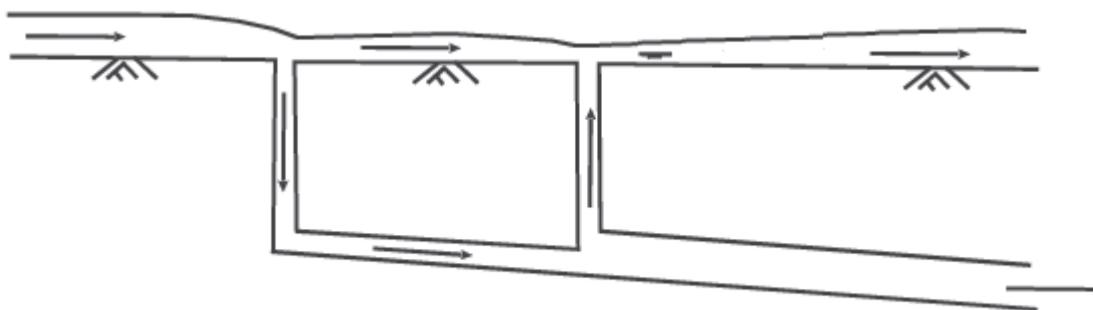


Figura 2.4 – Exemplo de sobrecarga do sistema (adaptado de Balmforth et al., 2006)

2.4 Modelação Hidrológica/Hidráulica

2.4.1 Introdução

Um modelo de simulação de sistemas de drenagem é usualmente composto por dois tipos de modelação, a modelação hidrológica e a hidráulica. A modelação hidrológica estuda a transformação da precipitação em escoamento. A modelação hidráulica, por sua vez, estuda o comportamento do escoamento ao longo do coletor, sem ter em consideração quais os processos que precedem a chegada do escoamento ao coletor. Um modelo de simulação deve, deste modo, conjugar a modelação hidráulica e a modelação hidrológica, simulando assim o processo completo.

Um modelo de simulação de drenagem urbana é usado para analisar qual o comportamento de determinado sistema de drenagem quando sujeito a diversos tipos de solicitações/condições. De um modo geral pode dizer-se que para dimensionar corretamente um sistema de drenagem é importante usar primeiramente um modelo de simulação hidráulica de modo a que este funcione corretamente após a sua implementação (Butler e Davies, 2011).

A Figura 2.5 apresenta a relação entre as várias fases da modelação hidrológica e hidráulica. Cada um destes tipos de modelação é pormenorizado posteriormente:

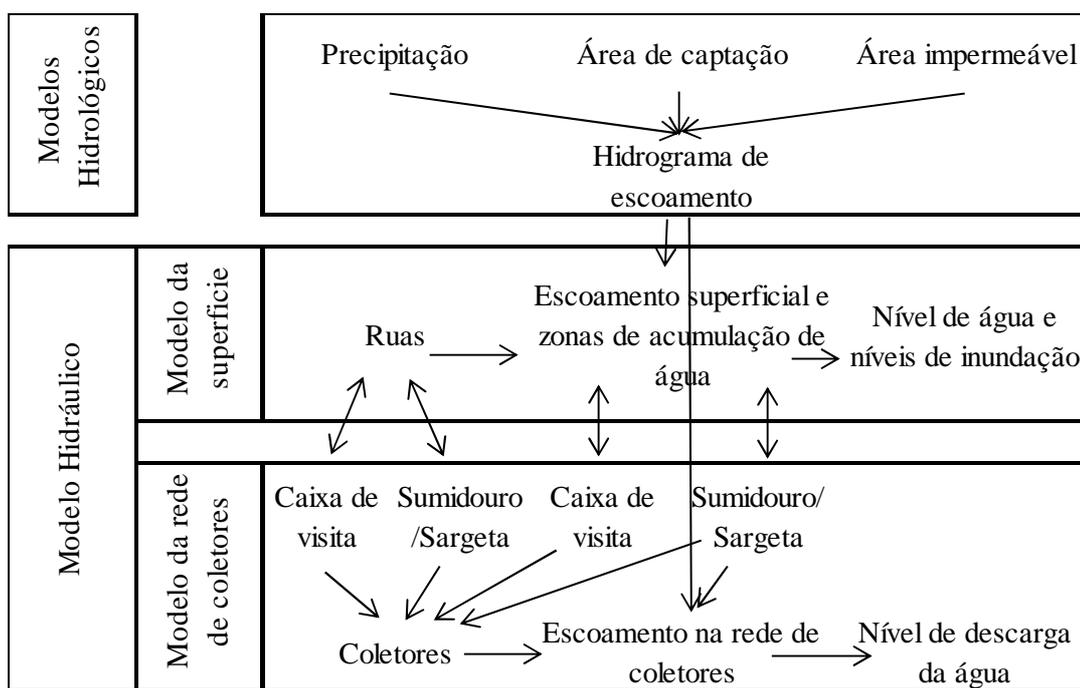


Figura 2.5 – Relação entre as várias fases da modelação hidrológica e hidráulica (adaptado de Mark et al., 2004)

A modelação computacional de sistemas de drenagem surgiu no início dos anos de 1980. Este avanço ao nível da gestão destes sistemas trouxe a necessidade da melhoria dos registos existentes sobre os sistemas visto que os modelos computacionais requerem informação atualizada e correta para que os resultados obtidos pela simulação sejam igualmente corretos (Butler e Davies, 2011).

As abordagens neste tipo de modelação podem ser divididas, de acordo com Tucci (1998), em várias classificações:

- Contínuo e Discreto:
 - Contínuo: Quando os fenómenos são contínuos no tempo;
 - Discreto: Quando as mudanças de estado se dão em intervalos não contínuos.
- Concentrado ou Distribuído:
 - Concentrado: Não tem em consideração a variabilidade espacial da bacia, ou seja, apresenta os resultados apenas num único ponto;
 - Distribuído: As suas variáveis e os seus parâmetros variam com o espaço, ou seja, apresenta os resultados em vários pontos, várias zonas.

- Estocástico ou Determinístico:
 - Estocástico: Quando para uma mesma entrada dada ao programa ele gera um determinado número de soluções diferentes quando efetuadas várias simulações;
 - Determinístico: Quando para uma mesma entrada dada ao programa ele gera uma única solução qualquer que seja o número de simulações efetuadas.
- Concetual ou Empírico:
 - Concetual: Tem em consideração conceitos físicos.
 - Empírico: Utilizam funções sem relação com os processos físicos envolvidos, baseando-se apenas em análises estatísticas, tais como análise de interpolação e regressão.

2.4.2 Precipitação

A precipitação pode definir-se como um evento meteorológico em que uma determinada quantidade de água é precipitada em forma de chuva. Um evento de precipitação ocorre durante um determinado período de tempo, designado por duração da chuvada, que vai desde o início até ao final desse evento de precipitação. Cada evento de precipitação é caracterizado por uma distribuição espacial e temporal diferente.

A natureza de uma chuvada é influenciada pelas estações do ano, chovendo mais, normalmente, no Inverno do que no Verão. Além disso, a distribuição de um evento de precipitação também é influenciada pela topografia, chovendo com mais intensidade nas zonas mais altas (Estellés, 2010).

Chow et al. (1988) apresenta três tipos de elevação de uma massa de ar que dão origem a precipitação:

- Elevação orográfica: uma massa de ar sobe para passar por uma cordilheira;
- Elevação frontal: o ar quente eleva-se sobre as massas de ar mais frias;
- Elevação convectiva: o ar é puxado para cima por ação convectiva, como por exemplo no centro de um ciclone.

A precipitação é frequentemente usada como o dado de entrada para os modelos hidrológicos, servindo como base, após variados estudos, para a elaboração de sistemas de drenagem e a previsão de inundações urbanas (Estellés, 2010). Neste trabalho em concreto a precipitação é exatamente usada como dado de entrada de modo a que se obtenham os resultados necessários à elaboração dos vários trabalhos propostos.

2.4.3 Modelos Hidrológicos

Tucci (1998) define um modelo hidrológico como um instrumento desenvolvido com o intuito de obter uma melhor compreensão acerca do comportamento de uma bacia hidrográfica. O modelo hidrológico mais simples é o método racional. Este modelo é o mais utilizado para estimar o caudal de ponta de cheia em pequenas bacias hidrográficas quer em Portugal quer no estrangeiro (Sá Marques e Sousa, 2008). A equação que exprime o método racional é a apresentada de seguida (equação (1)):

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (1)$$

A variável I representa a intensidade de precipitação e é considerada como constante, C representa as condições de escoamento da bacia e A representa a área da bacia, que tem de ser inferior a 25 km² de modo a que esta equação seja aplicável (Sá Marques e Sousa, 2008).

Os modelos hidrológicos que são utilizados nos *softwares* comerciais são, na grande parte dos casos, modelos conceituais ou empíricos. Alguns modelos conceituais, como o método racional já referenciado, o método do hidrograma unitário, o modelo da curva tempo-área ou os modelos de reservatório linear, apesar de normalmente não permitirem a simulação do processo precipitação-escoamento de forma adequada, continuam a ser utilizados (Leitão et al., 2008).

O método do hidrograma unitário é definido por Leitão et al. (2008) como, para um evento cuja precipitação tem uma duração definida, o hidrograma resultante do escoamento direto produzido por uma unidade de precipitação incidente sobre a bacia. Deste modo, hidrogramas para eventos de precipitação cuja duração é igual mas que possuem diferentes intensidades podem ser alcançados através do hidrograma unitário, assumindo que existe uma relação linear entre os hidrogramas.

Leitão et al. (2008) refere cinco simplificações inerentes a este método:

- A precipitação útil tem uma intensidade constante;
- A precipitação útil é uniformemente distribuída pela área da bacia;
- As ordenadas de todos os hidrogramas com uma base de tempo comum são diretamente proporcionais ao volume da precipitação útil;
- O princípio da sobreposição aplica-se aos hidrogramas que resultam de períodos de precipitação útil contínuos e/ou isolados.
- Para uma dada bacia, o hidrograma que resulta de um determinado volume de precipitação útil reflete as condições constantes da bacia.

No modelo da curva tempo-área o volume do escoamento superficial é controlado pelas perdas iniciais, pela área da bacia e pela perda hidrológica contínua. O tempo de concentração da bacia e a curva tempo-área controlam o hidrograma de escoamento. Na Figura 2.6 apresentam-se as curvas tempo-área para três tipos de geometria da bacia diferentes (Leitão et al., 2008):

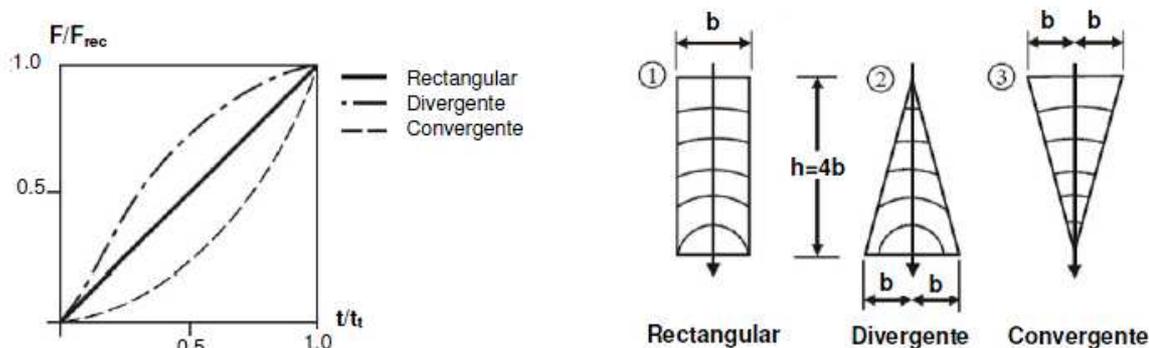


Figura 2.6 – Curva tempo-área de acordo com a área da bacia (Leitão et al., 2008)

Os modelos de reservatório caracterizam-se por apenas terem em conta a lei de conservação da massa, não considerando a equação de conservação da quantidade de movimento. Deste modo, a resposta da bacia é instantânea. Nos modelos de reservatório linear assume-se que uma bacia atua como um reservatório, na qual o caudal de saída é função linear do armazenamento (Leitão et al., 2008).

No SWMM, o modelo hidrológico usado considera cada sub-bacia como um reservatório não linear. As contribuições para cada sub-bacia são provenientes dos vários tipos de precipitação (neve, chuva, etc.) e de outras sub-bacias de montante.

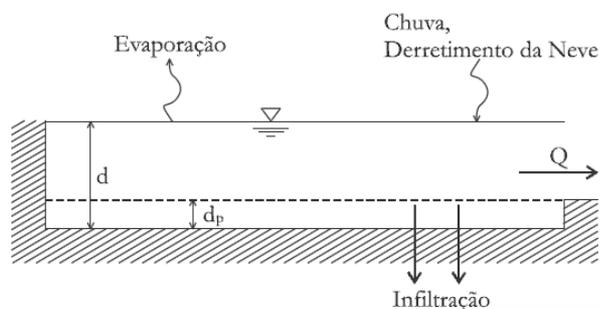


Figura 2.7 – Modelo hidrológico usado pelo *software* SWMM

A Figura 2.7 faz a representação do modelo hidrológico usado pelo SWMM. Neste modelo apenas existe caudal “ Q ” escoado quando a profundidade da água no “reservatório” excede o valor máximo “ d_p ” de armazenamento em depressões. A lâmina de água “ d ” na sub-bacia é calculada de forma contínua através da resolução do balanço hídrico.

A representação de uma sub-bacia no SWMM é apresentada na Figura 2.8. Neste *software* uma sub-bacia é representada com uma determinada largura e um determinado comprimento, sendo a sua área dividida em área permeável e área impermeável.

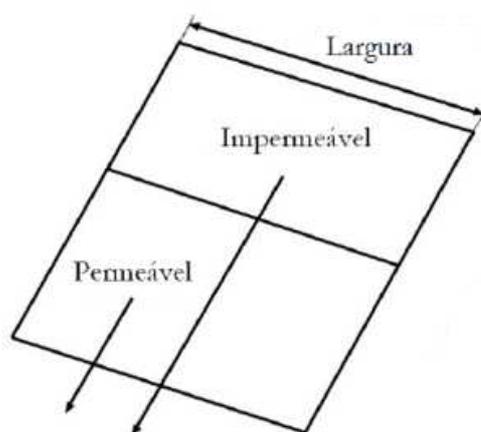


Figura 2.8 – Representação de uma sub-bacia usada pelo SWMM (adaptado de SWMM, 2013)

2.4.4 Modelos Hidráulicos

As equações matemáticas, quer unidimensionais quer bidimensionais, mais utilizadas nos modelos de simulação de sistemas de drenagem de modo a descrever o comportamento de um escoamento variável em superfície livre (abordagem mais tradicional) são as equações de Saint-Venant. Estas equações têm origem nas equações de Navier-Stokes, através da integração vertical das mesmas, considerando o seguinte (Simões, 2012):

- Componente da velocidade e da aceleração no eixo vertical desprezável;
- Pressão hidrostática;
- Fundo com pequena inclinação;
- Velocidade horizontal constante ao longo da vertical;
- Efeitos da turbulência e das tensões tangenciais considerados de uma forma agregada.

A forma conservativa das equações 1D de Saint-Venant é a seguinte (Simões, 2012):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad (3)$$

em que:

A – área molhada;

Q – caudal;

t – tempo;

h – altura do escoamento;

x – direção do escoamento;

g – aceleração gravítica;

S_0 – declive do canal;

S_f – função do atrito.

A primeira equação (2) representa a conservação da massa e a segunda equação (3) representa a conservação da quantidade de movimento.

A forma conservativa das equações 2D de Saint-Venant, por sua vez, é a seguinte:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (huv) = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (huv) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (6)$$

em que:

u – velocidade na direção x ;

v – velocidade na direção y ;

x – direção principal do escoamento;

y – direção do escoamento perpendicular a x ;

S_{0x} – declive do canal na direção x;

S_{0y} – declive do canal na direção y;

S_{fx} – função do atrito na direção x;

S_{fy} – função do atrito na direção y.

A equação (4) representa igualmente a conservação da massa e as equações (5) e (6) a conservação da quantidade de movimento, todas a duas dimensões agora.

Por vezes, devido a eventos de precipitação intensa, o volume de água nos coletores aumenta consideravelmente, chegando ao topo e transbordando. Isto acontece porque é atingido o limite para o qual o coletor foi dimensionado. É, então, de extrema importância modelar esta condição de uma forma adequada.

De modo a que as equações de Saint-Venant possam ser aplicadas em escoamentos em pressão é usual aplicar o conceito da fenda de Preissman (Butler e Davies, 2011). O conceito da fenda de Preissman traduz-se na introdução de uma fenda imaginária na parte superior do coletor, permitindo assim com que a altura de escoamento exceda o seu diâmetro e, deste modo, simular o efeito do escoamento em pressão (Figura 2.9).

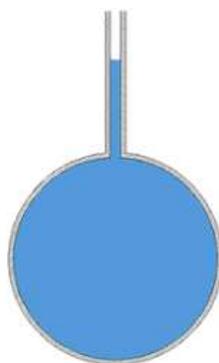


Figura 2.9 – Fenda de Preissman (Sá Marques et al., 2013)

Quando o fenómeno descrito nos últimos parágrafos acontece, ou seja, quando os coletores entram em carga, o escoamento pode sair dos coletores e passa também a escoar-se na superfície. Deste modo teremos escoamento no sistema de coletores, o qual se designa por sistema secundário, e escoamento superficial, designado por sistema principal. A um sistema como este, com dois componentes, dá-se usualmente o nome de drenagem dual (Djordjevic et al., 2005) como ilustra a Figura 2.10 apresentada de seguida.

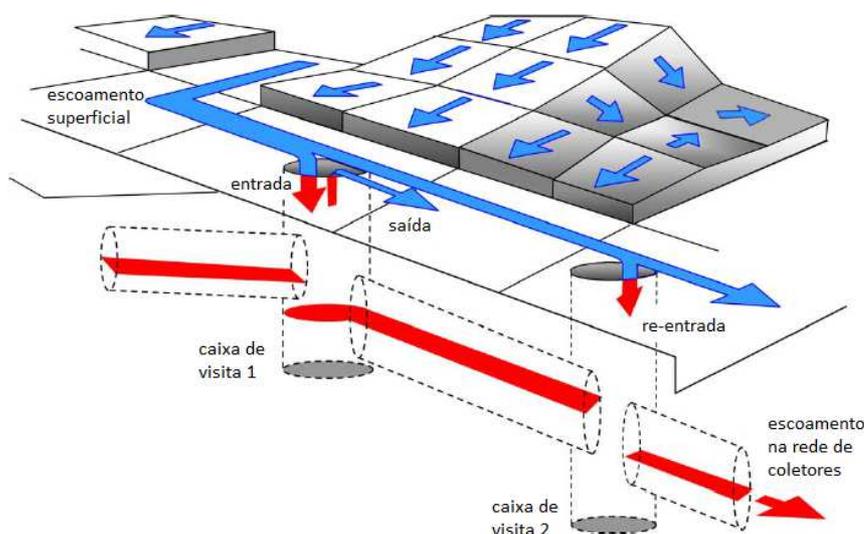


Figura 2.10 – Representação esquemática do conceito de drenagem dual (adaptado de Smith, 2006)

Atualmente existem duas abordagens distintas no que diz respeito aos modelos de drenagem dual: ambas usam um modelo unidimensional para a rede de coletores, sendo que uma representa também o escoamento superficial através de um modelo unidimensional, ou seja, temos uma abordagem 1D/1D, e a outra representa a superfície através de um modelo bidimensional, ou seja, a abordagem é 1D/2D (Sá Marques et al., 2013).

Num modelo 1D/1D a superfície é discretizada através da consideração do domínio como um conjunto de nós conectados por ligações, em que os nós representam as junções de canais, os cruzamentos ou as depressões no terreno, e as ligações são principalmente os canais abertos (Simões, 2012). Os modelos 1D/1D são, regra geral, mais rápidos que os modelos 1D/2D, visto serem mais simples (Simões, 2012). Allitt et al. (2009) apresenta este facto como uma vantagem considerável, principalmente quando é necessário efetuar um grande número de simulações. Contudo, o autor refere que os resultados deste tipo de simulações serão apenas aceitáveis quando a incerteza em relação aos caminhos superficiais que o escoamento seguirá seja pequena.

Os modelos 1D/2D baseiam-se em dividir a superfície em pequenos elementos individuais, onde cada um desses elementos tem associadas várias informações, tais como a elevação, o tipo de cobertura, as propriedades do solo e o coeficiente de rugosidade (Leitão, 2009). Estes são modelos mais complexos, pelo que o tempo de execução de cada simulação é mais longo. Apresentam, no entanto, uma maior certeza nos resultados, o que é uma vantagem significativa. Estes modelos são a melhor escolha quando se trata da simulação de eventos

extremos, quando na maior parte da superfície urbana existe escoamento multidirecional (Allitt et al., 2009).

No Quadro 2.1 apresentado de seguida mostra-se um pequeno resumo das características de cada um dos dois tipos de modelação referidos.

Quadro 2.1 – Características da modelação 1D/1D e 1D/2D

	Modelação	
	1D/1D	1D/2D
Descrição	Superfície discretizada considerando o domínio como um conjunto de nós ligados entre si.	Superfície divide-se em pequenos elementos individuais, tendo cada um várias informações associadas.
Velocidade de execução	Mais rápidos que os 1D/2D visto serem mais simples.	Mais lentos, visto serem mais complexos.
Certeza nos resultados	Apenas recomendável quando a incerteza em relação aos caminhos superficiais que o escoamento seguirá for pequena.	Apresentam resultados mais fiáveis.

2.4.5 Delineação da rede superficial – Ferramenta AOFD

A delineação da rede superficial pode ser feita através de uma metodologia desenvolvida por Maksimovic et al. (2009), designada por Delineação Automática do Escoamento Superficial (AOFD - *Automatic Overland Flow Delineation*).

Esta ferramenta, AOFD, usa uma metodologia para gerar um modelo de escoamento superficial que automaticamente cria uma rede de escoamento superficial que permite a sua interação com o sistema de drenagem. O processo consiste na análise de todo o modelo digital de terreno, procurando por pontos baixos no terreno. Com isso são delineadas as zonas de acumulação de água, a partir das quais são determinados os caminhos superficiais. Estes são resultado da determinação das direções de escoamento preferenciais, com base nas inclinações do terreno (Simões, 2012).

Segundo Maksimovic et al. (2009), a ferramenta AOFD delinea vários tipos de caminhos superficiais, que se referem seguidamente e se apresentam na Figura 2.11:

- De uma zona de acumulação de água para outra a jusante (i);
- De uma zona de acumulação de água para uma caixa de visita a jusante (ii);
- De uma zona de acumulação de água para fora da bacia (iii);
- Entre duas zonas de acumulação de água ligadas entre si (iv);

- De uma caixa de visita em carga para outra a jusante (v);
- De uma caixa de visita para uma zona de acumulação de água a jusante (vi);
- De uma caixa de visita em carga para fora da bacia (vii).

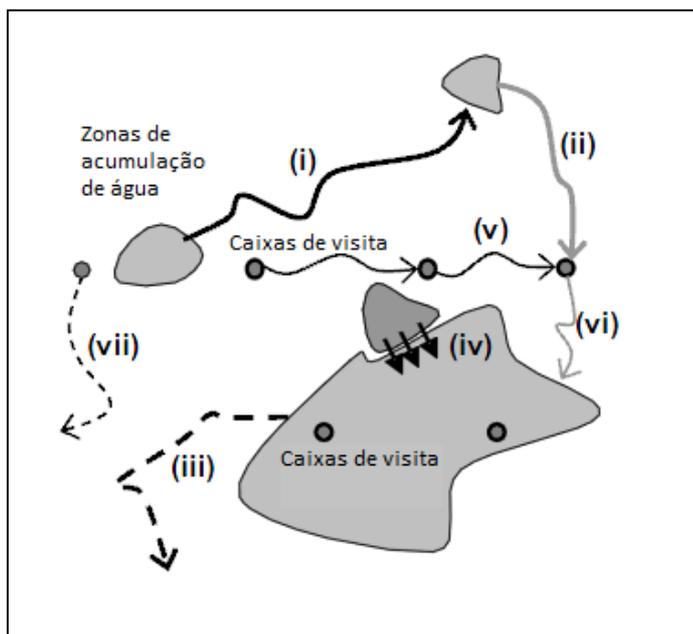


Figura 2.11 – Tipos de caminhos superficiais gerados pela ferramenta AOFD (adaptado de Maksimovic et al., 2009)

Esta rede superficial é posteriormente ligada ao modelo da rede de coletores, por forma a simular o sistema de drenagem dual. A Figura 2.12 mostra como a delimitação da rede superficial através da ferramenta AOFD é importante para se chegar posteriormente à rede de drenagem dual.

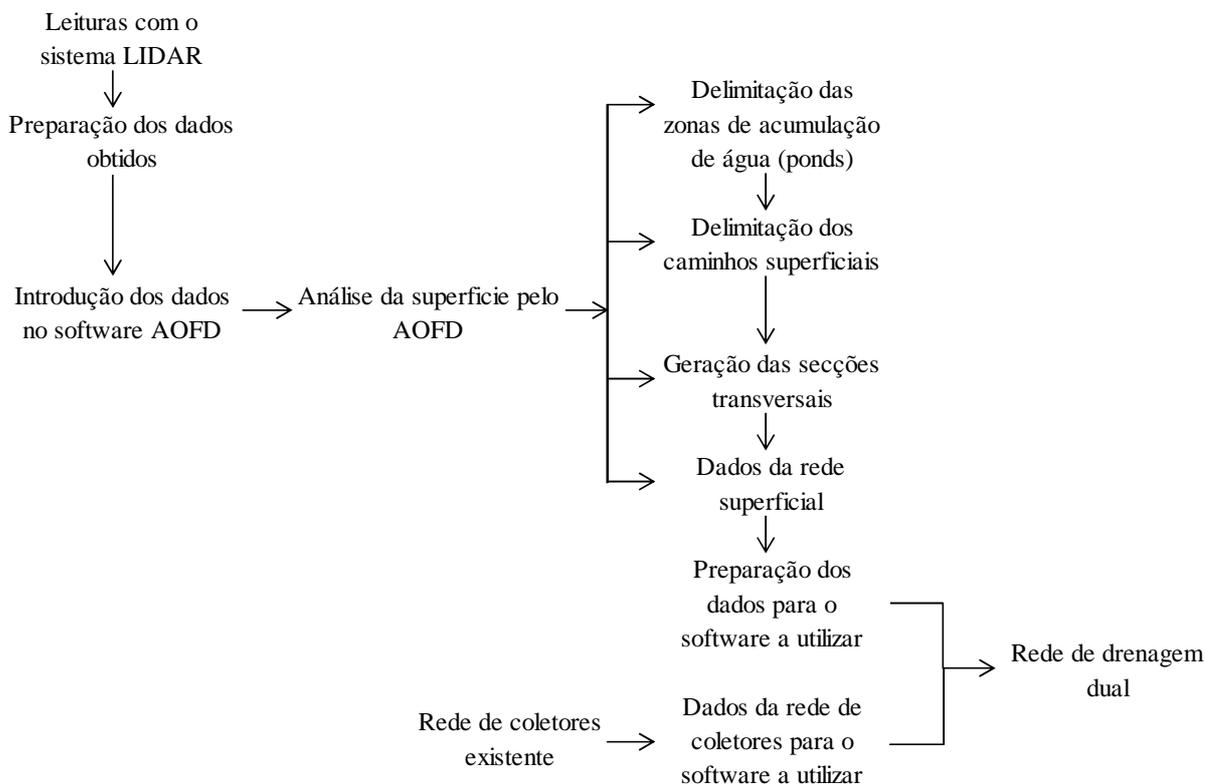


Figura 2.12 – Fases do processo de criação da rede de drenagem dual (adaptado de Adeyemo, 2007)

2.4.6 O Software SWMM

O *software* que será usado na realização deste trabalho será o EPA Storm Water Management Model (SWMM). O SWMM foi desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA) no ano de 1971 e tem vindo a sofrer várias atualizações desde essa data, com o intuito da sua melhoria.

O SWMM permite, além de simular redes ainda inexistentes que estejam projetadas, estudar casos reais e a simulação de vários cenários diferentes para a mesma rede. Deste modo, é possível prever situações prejudiciais para as redes existentes, permitindo assim que sejam tomadas as medidas necessárias atempadamente. Este *software* tem incluído os modelos hidrológico e hidráulico.

Segundo o descrito no próprio SWMM (Rossman, 2010) as suas aplicações típicas incluem:

- Projeto e dimensionamento dos componentes de um sistema de drenagem para o controlo de cheias;

- Dimensionamento de bacias de retenção para o controlo de cheias e da qualidade da água;
- Mapeamento dos sistemas de canais naturais de escoamento superficial;
- Avaliação do impacto da infiltração e dos caudais que entram nos coletores.

O *software* SWMM permite a utilização de três modelos diferentes para a simulação do escoamento: modelo de regime permanente, modelo cinemático e modelo dinâmico.

O modelo de regime permanente é o mais simples de todos. Neste modelo considera-se que em cada intervalo de tempo para o qual se efetua o cálculo o escoamento é uniforme e permanente.

O modelo de onda cinemática simula a variação temporal e espacial de escoamento numa conduta. Neste modelo é necessário ter a conduta com inclinação positiva, caso contrário o programa não efetua a simulação, visto que o modelo de onda cinemática não faz curvas de regolfo.

O modelo de onda dinâmica resolve as equações de Saint-Venant completas e, por isso, apresenta resultados teoricamente mais corretos e precisos. Este modelo obtém resultados para os níveis de água nos nós juntamente com o níveis de água do escoamento nas condutas, podendo por isso representar qualquer tipo de rede.

2.5 Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Drenagem Urbana

Os SIG (Sistemas de Informação Geográfica) são uma ferramenta importante para armazenar, gerir e analisar informação que necessite de ser georreferenciada. Com os SIG é possível fazer a gestão de redes de abastecimento de água, redes de gás, redes de tráfego, etc. É também possível gerar modelos digitais de terreno, cartas de declive, entre outros. Existem vários *softwares* que permitem trabalhar com SIG, como por exemplo o ArcGIS, o GeoMedia e o Smallworld GIS. Leitão (2009) apresenta três novas perspetivas para a ciência que surgiram na sequência do desenvolvimento dos SIG:

- Ajudou a relacionar espacialmente diferentes fenómenos, criando com isso novos desenvolvimentos;
- Serviu como base a novos conceitos matemáticos;
- Simplificou o processo de criação de mapas.

Ao longo dos últimos anos muitos modelos foram propostos baseados nos SIG, visto que estes são capazes de analisar características complexas do terreno (Estellés, 2010). Com um *software* que permita trabalhar os SIG é possível delinear linhas de água, direções de fluxo, etc. Esta técnica é, portanto, importante na simulação de inundações urbanas.

2.6 Modelos digitais de terreno

Para a realização de modelos digitais de terreno existem atualmente várias técnicas, sendo algumas mais simples e antigas e outras, não tão antigas, mais elaboradas. Leitão (2009) apresenta algumas das técnicas possíveis:

- Levantamento convencional por técnicas terrestres;
- Capturar dados fotogramétricos;
- Digitalização das curvas de nível de mapas topográficos;
- InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*);
- LIDAR (*Light Detection And Ranging*).

A tecnologia LIDAR, usada desde meados dos anos 90 (Leitão, 2009), permite obter a distância e outra informação a respeito de um determinado objeto distante através da utilização de um raio laser (ver Figura 2.13). Deste modo é possível delinear o modelo digital de terreno.

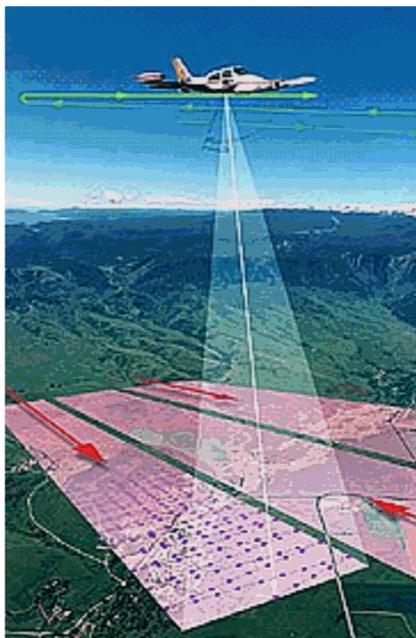


Figura 2.13 – Modelo LIDAR (Fonte: NRCS)

2.7 Gestão do risco de inundação

Ao longo das últimas décadas a preocupação com as inundações tem vindo a crescer. No entanto, a política de gestão de inundações passou do seu combate e defesa contra inundações para a adaptação a elas mesmas e a viver com elas. Daí surge o conceito de drenagem urbana integrada, conceito de planeamento para a “totalidade da bacia”. Este conceito reconhece a importância dos sistemas naturais (zonas húmidas, valas, lagoas) na atenuação dos picos de escoamento e na melhoria da qualidade da água (McDonald, 2010).

O objetivo principal da gestão do risco de inundação e sua prevenção deve basear-se no desenvolvimento de ações e de regras práticas para a gestão desse mesmo risco de inundação e das suas causas (Rocha, 1998). Em Portugal existe, para tratar dos problemas relacionados com inundações, a Proteção Civil. Esta tem o poder de adotar a estratégia necessária ao combate de uma inundação, consoante o que for mais necessário.

Um fator chave na prevenção/atenuação do risco de inundação são os SUDS (Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável). Estes são parte integrante do referido conceito de drenagem urbana integrada (McDonald, 2010). Elementos como bacias de retenção, valas artificiais, trincheiras de infiltração, entre outros, são alguns dos tipos de SUDS existentes. Estes elementos têm como principal objetivo ajustar o escoamento registado pós urbanização ao que já existia pré urbanização.

Rocha (1998) apresenta quatro tipos de ações que podem ser realizadas sobre as zonas inundáveis por forma a se fazer uma melhor gestão das inundações:

- Modificação das cheias;
- Modificação do impacto das cheias;
- Modificação da vulnerabilidade;
- Gestão dos recursos naturais e culturais.

A modificação das cheias pode ser feita através da construção de barragens e criação de albufeiras. A modificação do impacto provocado pelas cheias baseia-se em ações de assistência às pessoas e às comunidades, para a sua sobrevivência e para a recuperação após inundações não controladas. A modificação da vulnerabilidade passa por evitar utilizações perigosas ou indesejáveis das zonas inundáveis. A gestão dos recursos naturais e culturais deve ser feita através do controlo das cheias, avisos e evacuação e gestão das zonas inundáveis (Rocha, 1998).

2.8 Mapas de Zonas Inundáveis e Mapas de Risco

O conceito de risco é um conceito presente em muitas áreas do conhecimento, e é, por isso, dividido em diversos tipos, tais como risco económico, social, tecnológico, ambiental, entre outros (Hora e Gomes, 2009).

Betâmio de Almeida (2004) apresenta uma definição técnica e operacional da grandeza risco que é, segundo o autor, aceite atualmente, e que se traduz pelo produto entre a expectativa de ocorrências e a expectativa das consequências. Hora e Gomes (2009) apresentam como definição de risco o fornecido pelo Gabinete das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNISDR) que classifica o risco como a probabilidade de consequências prejudiciais ou perdas previstas resultando das interações entre perigos naturais ou sociais e circunstâncias vulneráveis.

Risco = Probabilidade x Consequência

Além da definição de risco importa salientar a existência de vários tipos de risco: diretos ou indiretos, mensuráveis e não mensuráveis (Ryu, 2008). Riscos indiretos são mais difíceis de classificar. Estes relacionam-se com as atividades económicas e sociais afetadas, e são, devido à maior subjetividade com que são caracterizadas, de mais difícil quantificação. Segundo Leitão (2009), os danos indiretos incluem a perda de produção ou lucro, a interrupção do tráfego, problemas de saúde e psicológicos e custos adicionais devidos a emergências e a trabalhos de limpeza.

Os mapas de risco resultam, como é natural, da aplicação do conceito de risco e da sua representação gráfica, onde se classifica um determinado local com o risco que lhe é associado. Contudo, quando se fala em risco deve-se clarificar qual o risco em concreto a que nos referimos. Ou seja, não existe simplesmente risco, este tem que estar associado a algo, resultando em, por exemplo, risco de incêndio, risco de explosão, risco de inundação. É exatamente sobre este último risco que se focará este trabalho, o risco de inundação.

O risco de inundação tem aumentado significativamente nas últimas décadas, maioritariamente em zonas urbanas, muito devido ao facto de haver cada vez mais intervenção humana nestas zonas e também devido a fenómenos de precipitação extrema em curtos períodos de tempo. Este facto é tão importante nos dias de hoje que a União Europeia assumiu, através da Diretiva 2007/60/CE, ser "...necessário prever a elaboração de cartas de zonas inundáveis e de cartas de riscos de inundações indicativas das potenciais consequências prejudiciais associadas a diferentes cenários de inundações...".

Os mapas de risco que serão elaborados neste trabalho serão então mapas de risco de inundação, que classificarão, de uma forma quantitativa, cada zona de determinada área com o correspondente risco de inundação a que está sujeita.

Para a elaboração deste tipo de mapas é necessário, tal como já foi referido, ter em conta a probabilidade e a consequência de determinado acontecimento, neste caso, de uma inundação. Deste modo, é preciso clarificar os níveis de probabilidade e quais as consequências que serão considerados nesta análise. Quanto à classificação das classes de probabilidade estas podem dividir-se entre rara, pouco provável, moderadamente provável, provável e bastante provável. Poderá haver dificuldade ou divergências, contudo, na quantificação, em termos percentuais, dos intervalos nos quais se encontra cada classe de probabilidade referida.

No âmbito da análise de inundações e dos seus efeitos é usual elaborar mapas que indicam a probabilidade de determinada zona inundar, sendo estes mapas designados de mapas de zonas inundáveis, como o apresentado na Figura 2.14. A elaboração de um mapa de zonas inundáveis envolve uma análise hidrológica e hidráulica.

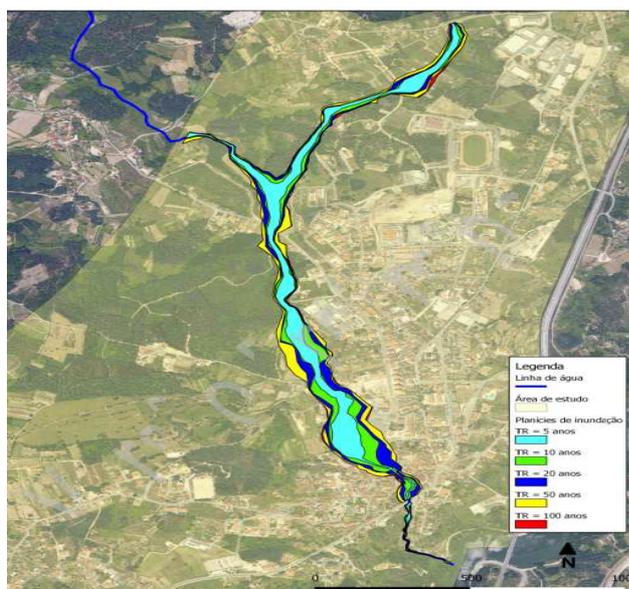


Figura 2.14 – Exemplo de mapa de zonas inundáveis (Sá Marques et al., 2010)

Através do estudo de uma chuvada com vários períodos de retorno diferentes obtém-se a indicação das zonas propícias a inundar quando se verifica um evento de precipitação com uma determinada probabilidade (inverso do período de retorno).

Tal como a classificação que é feita para os níveis de probabilidade é necessário também definir, tal como referido, as consequências da inundação que serão tidas em conta no estudo em questão, e também a métrica que será usada para quantificar a gravidade de cada consequência. As consequências a considerar podem ser variadas, sendo que a Diretiva

2007/60/CE define como potenciais consequências em caso de inundação as apresentadas de seguida:

- Número indicativo de habitantes potencialmente afetados;
- Tipo de atividade económica da zona potencialmente afetada;
- Instalações que possam causar poluição acidental em caso de inundações;
- Outras, como por exemplo zonas onde, caso ocorra uma inundação, arrastem um elevado volume de sedimentos e detritos.

Algo essencial à elaboração de um mapa de risco é uma matriz de risco, que traduz a conjugação entre a probabilidade e a consequência, fornecendo assim uma classificação para cada zona em análise no mapa de risco. Assim, depois de ter os níveis de probabilidade e as consequências a considerar é possível elaborar essa matriz de risco. A Figura 2.15 é um exemplo de uma matriz de risco.

	Consequências					
Bastante Provável	Médio	Alto	Alto	Alto	Alto	Probabilidade
Provável	Médio	Médio	Alto	Alto	Alto	
Moderadamente Provável	Baixo	Médio	Médio	Alto	Alto	
Pouco Provável	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Alto	
Rara	Baixo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	
	Insignificante	Significante	Grave	Muito Grave	Catastrófico	

Figura 2.15 – Exemplo de matriz de risco (adaptado de ERM Risk and Safety)

O mapa de risco é o resultado da análise que permite classificar cada zona da área em estudo consoante o risco desta mesma zona em inundar. Usualmente utilizam-se as cores verde, amarelo e vermelho (ou verde, laranja e vermelho) para definir uma determinada zona como tendo um baixo, moderado e alto risco de inundação, respetivamente. Estas cores podem ser alteradas consoante o autor de cada mapa de risco, não tendo que ser necessariamente as três apresentadas. A Figura 2.16 é exemplificativa de um mapa de risco de inundação.

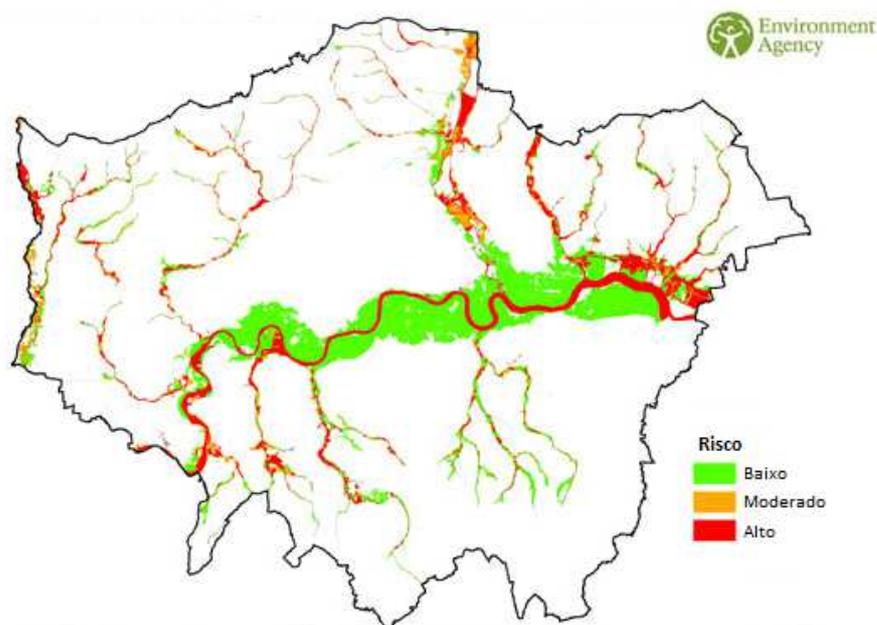


Figura 2.16 – Exemplo de mapa de risco de inundação (adaptado de Environment Agency – UK)

A análise em relação ao impacto causado por uma inundação através de mapas de risco poderá ser feita através da quantificação do custo resultante dos prejuízos diretos provocados por uma inundação.

Os prejuízos resultantes de uma inundação estão diretamente relacionados com a altura de água aquando de uma inundação e também com a velocidade de escoamento dessa água. Como é natural, alturas de água elevadas e velocidades também elevadas têm um maior impacto quer nas infraestruturas quer nos peões que circulam numa zona que seja atingida por uma inundação.

Para a realização deste estudo é necessário conhecer o custo dos referidos danos por metro de altura de água, por exemplo, de modo a que se possa quantificar o valor dos prejuízos (materiais, económicos, sociais, etc.). Existem já alguns estudos efetuados neste âmbito, como por exemplo no Brasil (Machado et al., 2005) e em Inglaterra (Penning-Rowell, em Leitão, 2009), mas não existem ainda em Portugal. Machado et al. (2005) propõe uma metodologia para a quantificação dos custos dos danos em função da altura de água atingida. Balmforth et al. (2006), contudo, sublinha que outros parâmetros, tais como a velocidade de escoamento e a duração da chuvada, deveriam também ser considerados na estimação dos referidos custos.

Conhecidos estes valores é possível elaborar um mapa de risco que tem em conta o custo dos danos provocados por uma inundação nas várias zonas afetadas.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Na realização deste trabalho será usada modelação hidrológica e modelação hidráulica (drenagem dual 1D/1D), que permitirão a obtenção dos resultados necessários à elaboração dos mapas de risco. Indispensáveis à elaboração dos referidos mapas são os mapas de zonas inundáveis, que por sua vez necessitam de um modelo digital de terreno para que sejam desenvolvidos. Neste capítulo aborda-se a metodologia usada para a elaboração dos mapas de zonas inundáveis primeiramente e de seguida aborda-se a metodologia usada na classificação do risco.

3.2 Metodologia para a elaboração de mapas de zonas inundáveis

3.2.1 Introdução

Para a elaboração dos mapas de zonas inundáveis é necessário efetuar a simulação do sistema de drenagem, de modo a que se obtenham resultados que permitam perceber quais as zonas que inundam. Assim, é necessária a rede de drenagem do sistema em estudo, que neste caso, tal como já referido, é uma rede de drenagem dual. Os elementos necessários à realização da modelação hidrológica/hidráulica são a precipitação, a cartografia do terreno e o respetivo cadastro e a rede de drenagem.

3.2.2 Precipitação

Os eventos de precipitação considerados para o trabalho foram obtidos, de acordo com Chow et al. (1988), através da aplicação do método dos blocos alternados, tendo sido utilizadas as curvas IDF regulamentares por forma obter a intensidade de precipitação. A duração dos eventos de precipitação foi igual a três vezes o tempo de concentração da bacia. Segundo Portela et al. (2000), a utilização de um evento de precipitação com duração três vezes superior ao tempo de concentração da bacia pode conduzir a um caudal de ponta de cheia superior ao caudal de ponta resultante de um evento com duração igual a T_c . Pode-se, portanto, chegar a valores do caudal de ponta mais baixos do que os que realmente se verificam ao utilizar-se uma chuvada com duração igual ao tempo de concentração da bacia. O tempo de concentração da bacia é, segundo a análise realizada, próximo de 45 minutos, pelo que a duração da chuvada que foi simulada é o triplo desse valor, ou seja, 135 minutos. O período de retorno das chuvadas simuladas é de 20 e 100 anos.

Nas Figuras seguintes apresentam-se os eventos de precipitação obtidos através do método dos blocos alternados e utilizados na realização do trabalho (Figura 3.1 para Tr de 20 anos e Figura 3.2 para Tr de 100 anos):

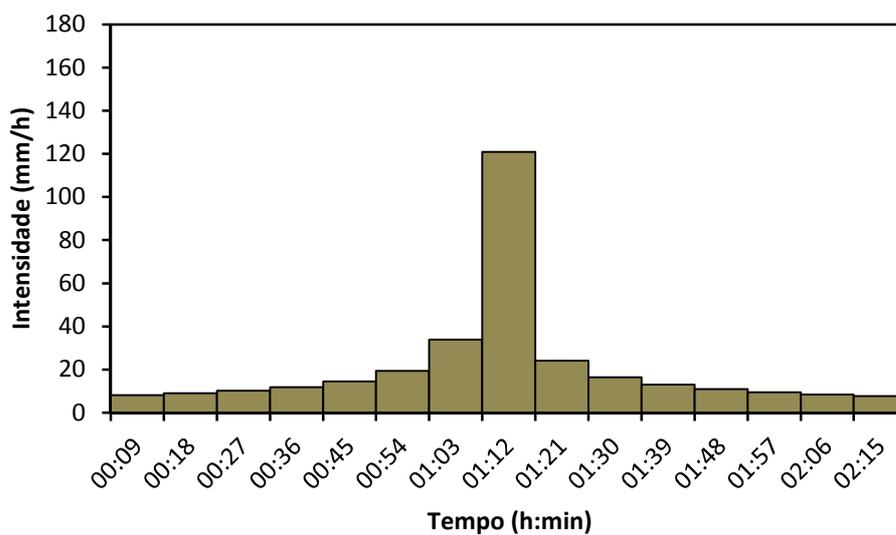


Figura 3.1 – Precipitação para Tr de 20 anos

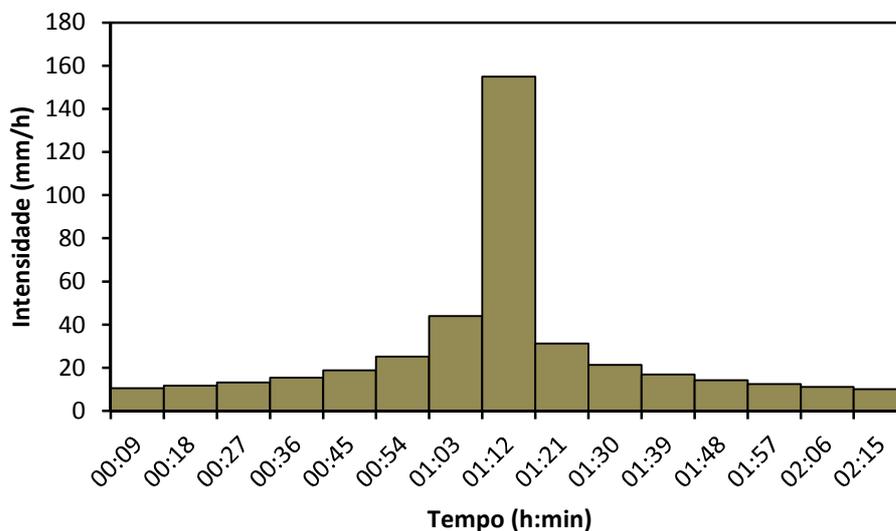


Figura 3.2 – Precipitação para Tr de 100 anos

3.2.3 Modelação hidrológica/hidráulica

Tendo a cartografia do terreno e o cadastro, e com a rede drenagem que se obteve da forma como se explica de seguida, foi possível efetuar a modelação hidrológica/hidráulica do sistema de drenagem, a partir do qual se chega aos resultados necessários à realização do trabalho proposto.

A modelação será feita aplicando o conceito de drenagem dual, como já referido, sendo que será utilizado um modelo 1D/1D. O modelo usado pode ser classificado como, de acordo com os vários tipos de classificação apresentados por Tucci (1998), contínuo, distribuído, determinístico e concetual. A partir desta modelação serão obtidos os resultados que permitirão a elaboração dos mapas de zonas inundáveis. Estes serão realizados através da análise dos resultados e consequente demarcação das zonas que inundam, consoante as diferentes alturas de água pela qual serão afetadas.

3.2.4 Rede de Drenagem Dual

Na geração do modelo digital de terreno usado neste trabalho foi usada a tecnologia LIDAR. O modelo LIDAR é de 1 m de lado e tem uma precisão vertical entre 10 e 15 cm.

Com base no modelo digital de terreno o desenho da rede de escoamento superficial é feito automaticamente através da metodologia de Delineação Automática do Escoamento Superficial (AOFD – *Automatic Overland Flow Delineation*).

Tendo delineada a rede de escoamento superficial e tendo a rede de coletores é assim possível juntá-las, chegando à rede de drenagem dual. Esta rede foi usada por Simões (2012) no *software* InfoWorks CS, e será também usada neste trabalho, sendo que o *software* aqui utilizado é o SWMM.

3.3 Metodologia para a classificação do risco

A classificação do risco de inundação será efetuada através da elaboração de mapas de risco que resultarão da aplicação de uma metodologia quantitativa, que classifica o risco de acordo com o custo resultante dos danos provocados por uma inundação.

A abordagem quantitativa é uma metodologia que visa a quantificação do valor monetário associado aos danos provocados por uma inundação. Existem já vários estudos no âmbito da realização desta quantificação, sendo a maior parte deles focados nos custos resultantes dos danos diretos devidos a uma inundação (Leitão, 2009). Segundo Ryu (2008), ainda não se chegou a um acordo em relação à metodologia a usar para a quantificação dos danos indiretos devidos a uma inundação.

Os danos resultantes de uma inundação dependem de vários parâmetros, quer relacionados com a própria chuva que deu origem à inundação e à própria inundação, tais como a altura

de água atingida, a velocidade de escoamento e a duração da chuvada, quer relacionados com as próprias infraestruturas afetadas, tais como o tipo e o uso do edifício e o número de habitantes e a sua classe social (Leitão, 2009).

Esta metodologia envolve a aplicação de funções de custo que serão adaptadas a Portugal através da comparação do Produto Interno Bruto *per capita* de Portugal com o do Reino Unido, cujas curvas utilizadas na aplicação desta metodologia são conhecidas.

A metodologia usada neste estudo para a quantificação dos custos associados a uma inundação baseia-se na seguinte sequência:

1. Identificação das zonas inundáveis (como referido no subcapítulo anterior);
2. Identificação das infraestruturas afetadas;
3. Estimativa da altura de água para cada área de zona inundável, baseado nos resultados da simulação hidráulica;
4. Estimativa do dano causado pela inundação, baseado nas funções de custo que relacionam altura de água-custo dos danos;
5. Registo dos resultados.

Apresenta-se de seguida a Figura 3.3 que mostra uma proposta para a relação entre a altura de água e o custo dos danos provocados por uma inundação.

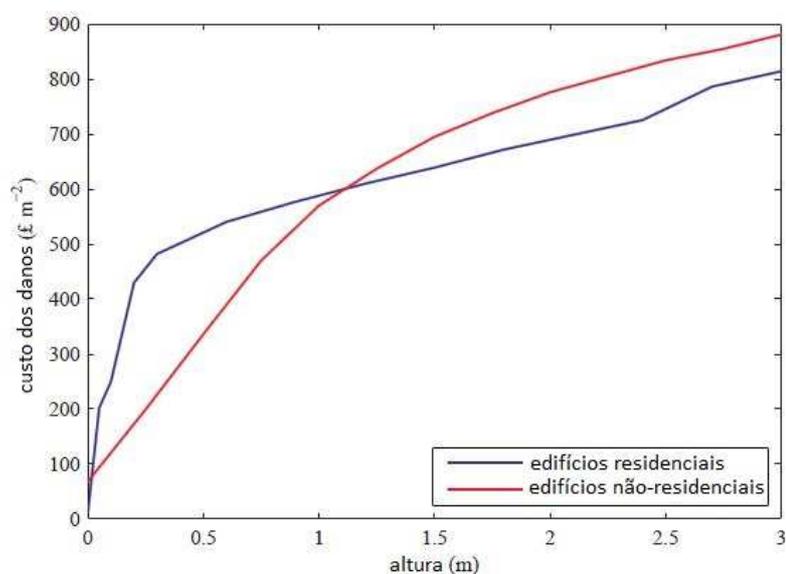


Figura 3.3 – Relação entre a altura de água e o custo dos danos (adaptado de Penning-Rowell, em Leitão, 2009)

A curva que será usada na realização é adaptada das apresentadas na Figura anterior. A adaptação passa por, como já referido, após se obter uma função que expresse a relação custo-altura de água, relacionar o Produto Interno Bruto *per capita* do Reino Unido (ao qual estas curvas se referem) com o PIB *per capita* Português e ainda a conversão do valor do custo resultante de Libras Esterlinas para Euros.

Como se pode observar na Figura 3.3 existem duas curvas para expressar o custo dos danos em função da altura de água: uma para edifícios residenciais e outra para não-residenciais. A zona crítica da zona em estudo, sobre a qual se focará a análise, é, ao nível do rés-do-chão que é a zona da infraestrutura que é afetada pelas inundações, maioritariamente constituída por espaços comerciais, pelo que será usada a curva referente a edifícios não-residenciais. Apresenta-se na Figura 3.4 a curva de custo com a respetiva equação que a traduz:

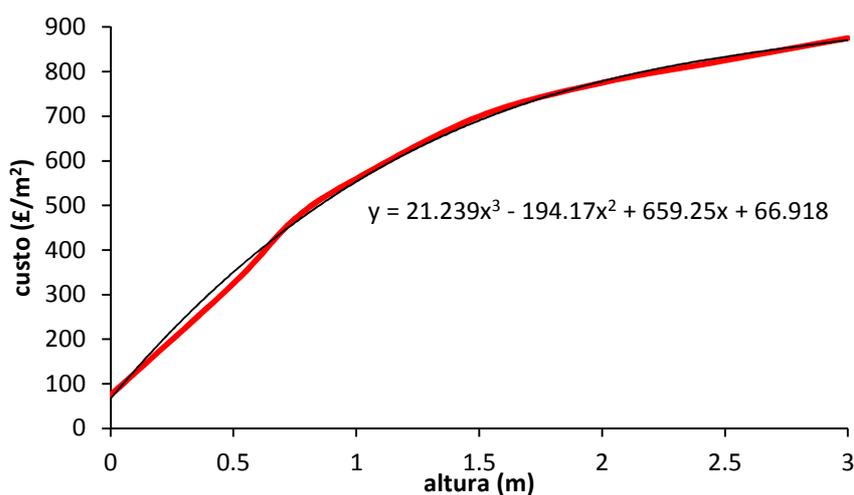


Figura 3.4 – Curva de custo dos danos

Sendo o valor do PIB *per capita* do Reino Unido, segundo o The World Bank (2013), igual a 38.974 US\$ e o PIB *per capita* de Portugal igual a 22.485 US\$, temos uma relação entre estes dois valores de aproximadamente 1.7. Este será o fator de conversão para que se obtenha uma curva de custo dos danos referente a Portugal (de uma forma aproximada). Além disso, tem-se ainda que converter as unidades monetárias de Libras Esterlinas para Euros. Segundo o Banco de Portugal (2013), à data da realização deste trabalho 1 Libra Esterlina corresponde a 1.17 Euros. Assim, a expressão final que traduz o custo dos danos de inundação é a apresentada de seguida (Equação (7)):

$$\text{Custo (€}/\text{m}^2) = \frac{21.239h^3 - 194.17h^2 + 659.25h + 66.918}{1.7} \times 1.17 \quad (7)$$

em que:

h – altura do escoamento

Tem-se assim a curva de custo que será usada para a elaboração dos mapas de risco.

3.4 Caso de estudo

A zona em estudo situa-se na cidade de Coimbra. Esta é uma cidade do centro de Portugal (ver Figura 3.5), capital de distrito, com cerca de 140 mil habitantes no seu município. Um dos principais focos de interesse desta cidade é a Universidade de Coimbra, instituição académica histórica reconhecida a nível mundial.

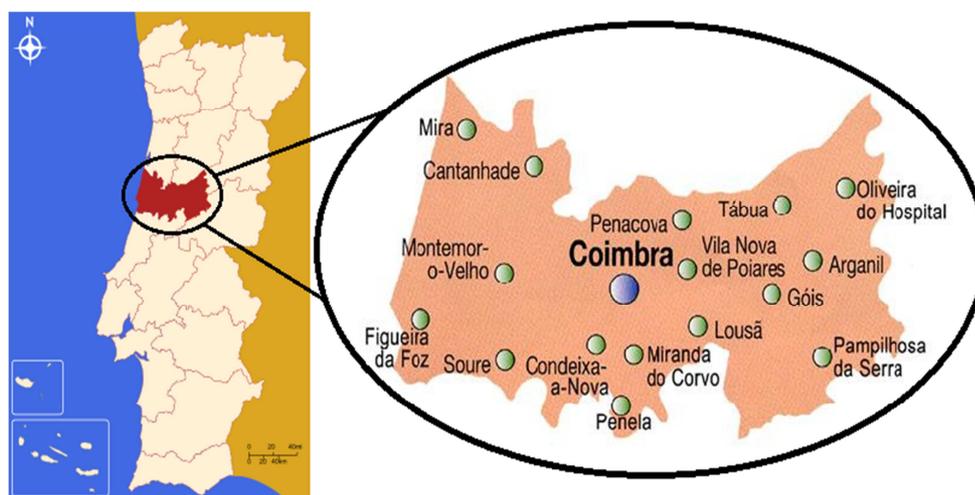


Figura 3.5 – Localização da cidade de Coimbra em Portugal

A zona em estudo é a zona central de Coimbra. A sua bacia hidrográfica tem uma área total de aproximadamente 1.5 km^2 . O sistema de drenagem existente tem um comprimento de 34.8 km, dos quais apenas 1.2 são exclusivamente para escoamento de águas pluviais. O tempo de concentração desta bacia é estimado em 45 minutos.

O foco de estudo centrar-se-á, no entanto, não sobre a totalidade da área em estudo mas apenas numa área considerada crítica (a vermelho na Figura 3.6), visto ser uma zona baixa onde facilmente se acumula água. Ou seja, as simulações serão realizadas para a totalidade da bacia, de modo a que não se altere o seu funcionamento como um todo, mas os resultados que serão tratados e apresentados serão apenas os correspondentes à referida área crítica.



Figura 3.6 – Zona central de Coimbra. A zona a vermelho mostra a área crítica desta bacia

Na Figura 3.7, apresentada de seguida, mostra-se o modelo digital de terreno, a carta de declives e a carta de orientações da zona em estudo.

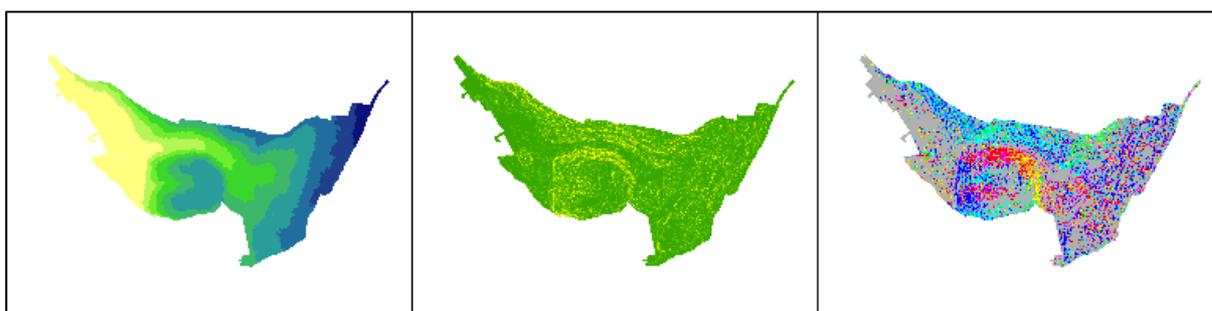


Figura 3.7 – Modelo digital de terreno (à esq.), carta de declives (ao centro) e carta de orientações (à dir.)

Na Figura 3.8 apresenta-se com maior pormenor o modelo digital do terreno, tendo sido incluída nesta representação a edificação presente na zona em estudo:

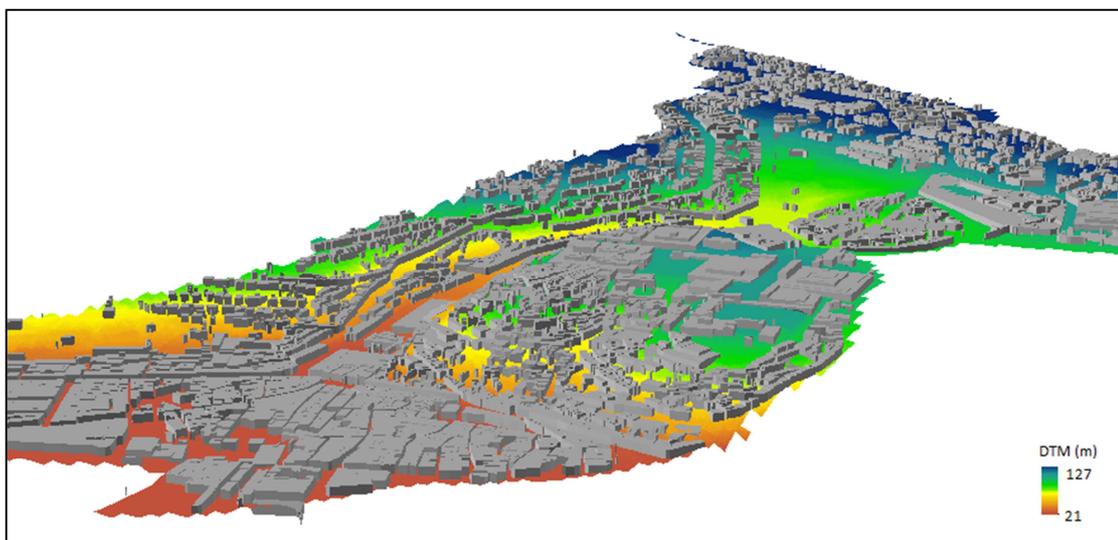


Figura 3.8 – Modelo Digital de Terreno (+ edificação)

Como se pode observar através do modelo digital de terreno apresentado a zona crítica é uma zona baixa, o que faz com que esta seja uma zona que tem vindo a sofrer várias inundações urbanas. Na área crítica mencionada têm-se verificado nos últimos anos, de facto, diversas inundações, entre as quais se destacam as de 9 de Junho de 2006 (Figura 3.9) e de 21 de Setembro de 2008 (Figura 3.10).



Figura 3.9 – Praça 8 de Maio na cheia de 09/06/2006



Figura 3.10 – Praça 8 de Maio na cheia de 21/09/2008

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 Introdução

O modelo matemático da rede em estudo (zona central de Coimbra) já se encontrava construído, tendo sido importado para o *software* SWMM a partir do *software* InfoWorks CS. Visto os dois *softwares* terem uma estrutura de dados distinta a importação originou algumas dificuldades. Foi, portanto, necessário começar por corrigir alguns problemas resultantes dessa mesma importação, como por exemplo alterar o sentido de algumas condutas que se encontravam a escoar no sentido contrário ao real.

Depois de corrigidos os vários problemas que surgiram e de realizados alguns testes ao funcionamento da rede percebeu-se que a ligação entre os caminhos superficiais e a rede de coletores não se encontrava correta, ou seja, a descida de água da superfície para os coletores não era controlada, e não havia uma certeza clara quanto ao comportamento da rede quando os coletores entravam em carga.

Assim, efetuaram-se várias alterações e inúmeros testes não só na rede como também em modelos simplificados, com o intuito de se conseguir simular corretamente um sistema de drenagem dual no *software* em utilização, o SWMM.

Apresentam-se nos subcapítulos seguintes os resultados finais dos vários testes realizados e a rede em estudo já com as alterações que se verificou serem necessárias de modo a que esta simulasse corretamente um sistema de drenagem dual.

4.2 Modelação de sistemas de drenagem dual

4.2.1 Exemplo 1 – Água na rede superficial, sem controlo da entrada de caudal nas várias caixas de visita

Inicialmente criou-se um pequeno modelo simplificado na tentativa de perceber como poderia ser aplicado o conceito de drenagem dual no SWMM. Começou-se por simplesmente ligar os coletores e os caminhos superficiais num único nó (caixa de visita), no qual os caminhos superficiais se ligavam ao topo da caixa de visita e os coletores ao fundo da mesma. A Figura 4.1 mostra a representação simplificada deste modelo:

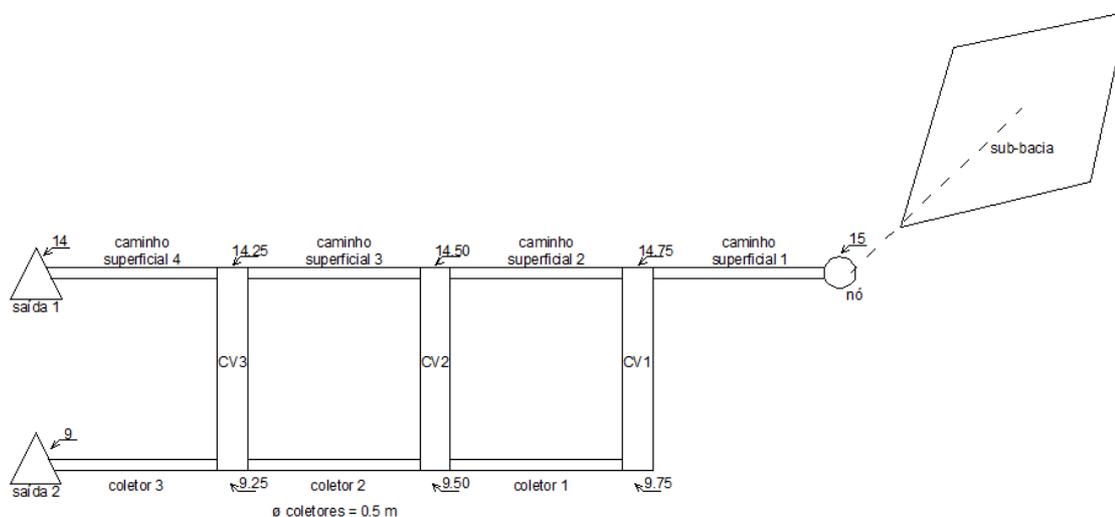


Figura 4.1 – Esquema do modelo simplificado inicial

Percebeu-se com este modelo simplificado que o escoamento existente no primeiro caminho superficial entra todo na primeira caixa de visita, passando a ser escoado totalmente pelo coletor. Este caso pode, de facto, existir em determinados tipos de rede, mas no caso concreto que está em estudo não é isso que acontece, visto que os declives são, regra geral, consideráveis e o escoamento não entra totalmente para as caixas de visita, seguindo também para o caminho superficial seguinte. Teve então que se procurar uma forma de controlar a entrada de escoamento nos coletores.

Este controlo é de extrema importância para o trabalho que está a ser realizado, visto que, como já foi referido, nem sempre o caudal que se encontra à superfície escoar na totalidade para os coletores. Leandro (2008) refere mesmo que é esta característica que permite uma correta modelação de inundações urbanas. Segundo Simões (2012), nesta rede em particular esta abordagem deve ser tomada no âmbito da modelação de inundações, e portanto não poderia deixar de ser realizada.

Como podemos observar pela Figura 4.2, onde se apresentam os valores de caudal obtidos através desta simulação quando o regime de escoamento já se encontrava permanente, o caudal escoado no primeiro caminho superficial entra na primeira caixa de visita sem qualquer controlo, passando a ser totalmente escoado nos coletores.

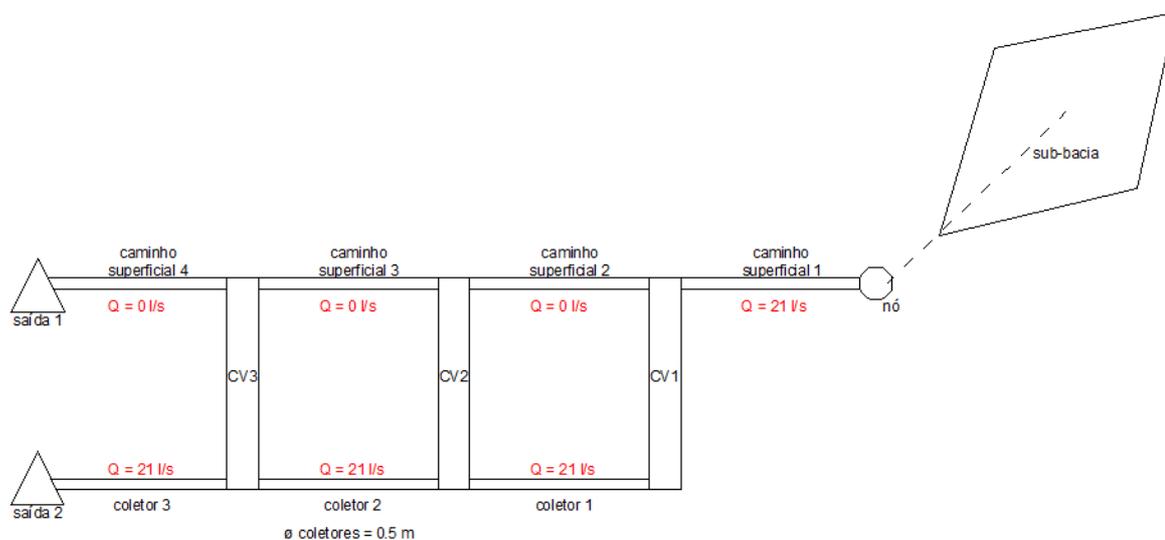


Figura 4.2 – Resultados obtidos através do modelo simplificado inicial

4.2.2 Exemplo 2 – Água na rede superficial, com controlo da entrada de caudal nas várias caixas de visita

Para se conseguir fazer o controlo da entrada de caudal nos coletores teve que se introduzir um “outlet” que permite o controlo do escoamento, podendo-se assim definir a quantidade de caudal que entra nas caixas de visita. O esquema deste modelo é apresentado na Figura 4.3:

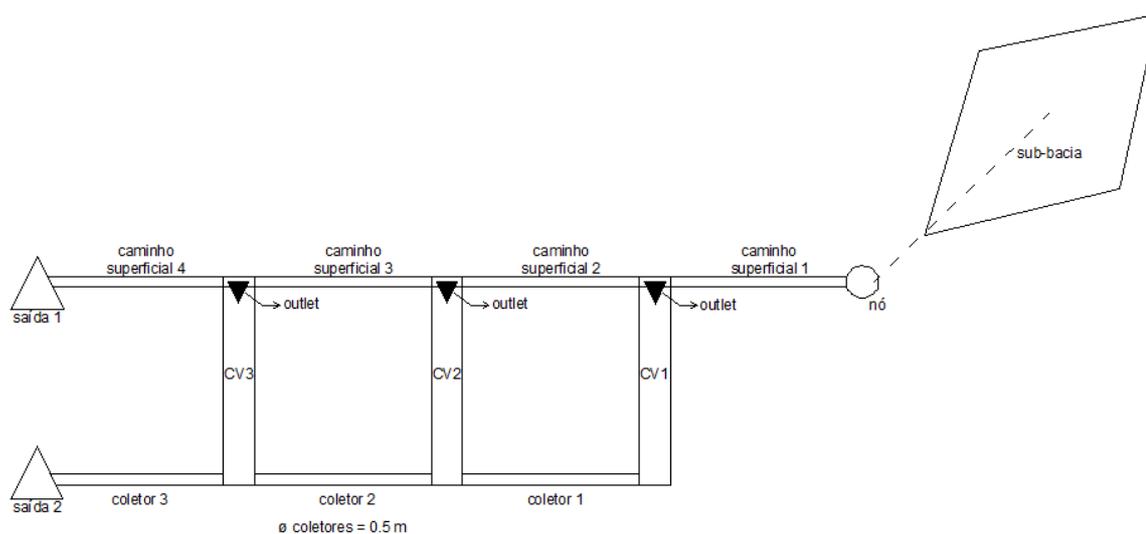


Figura 4.3 – Modelo simplificado com “outlets” de controlo de entrada

Tendo esta representação esquemática da rede simplificada testou-se o funcionamento dos “outlets”, ou seja, verificou-se se a curva de controlo de escoamento destes elementos estaria próxima do desejado (Quadro 4.1). Este controlo é feito exatamente pela introdução de uma curva de controlo nas definições do “outlet”. A Figura 4.4 demonstra os resultados observados após a introdução da curva de vazão.

Quadro 4.1 – Curva de vazão implantada nos “outlets”

h (m)	Q (m³/s)
0	0
0.05	0.035
0.10	0.05
10	0.05
50	0.05

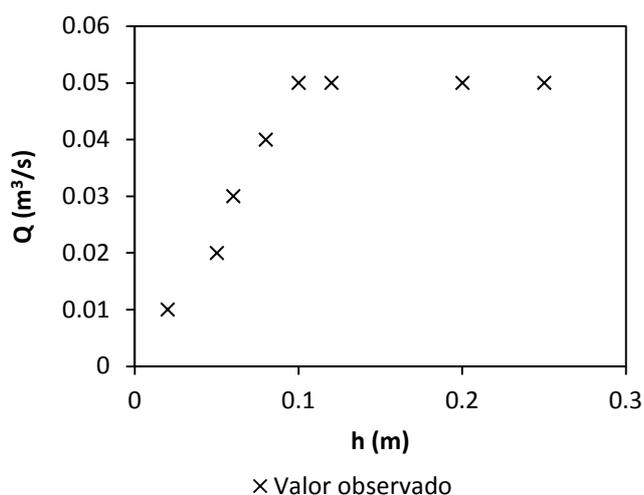


Figura 4.4 – Relação entre caudal (Q) e altura de água (h)

Apresenta-se de seguida a Figura 4.5 com os resultados de uma simulação num instante em que o escoamento já se encontrava em regime permanente, que mostra que deste modo já há controlo na entrada do escoamento nas caixas de visita.

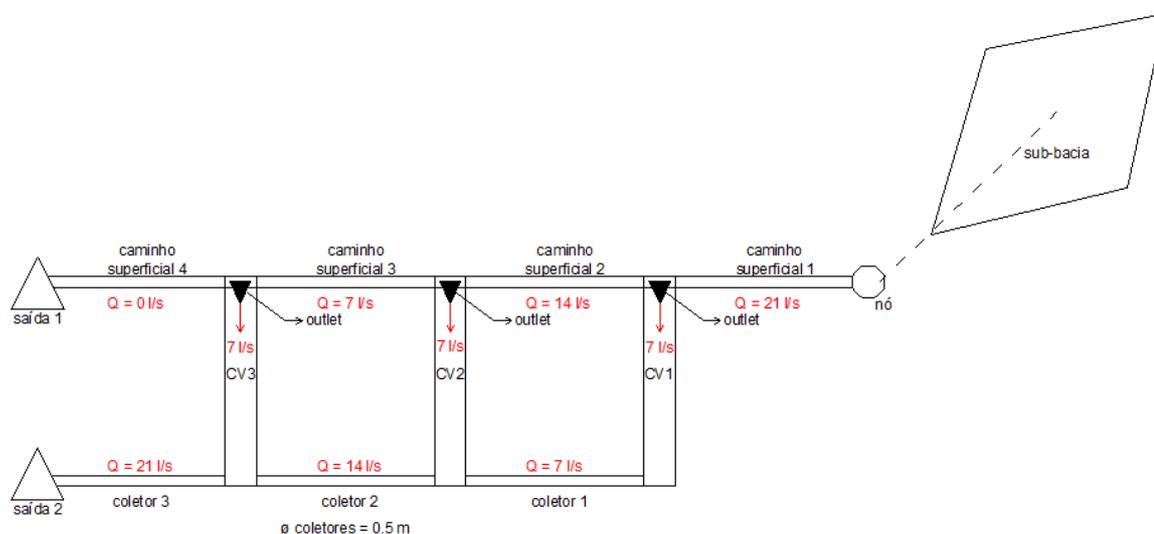


Figura 4.5 – Resultados do modelo simplificado com “outlets” de controlo de entrada

4.2.3 Exemplo 3 – Água na rede de coletores, com controlo da saída de caudal em caso de sobrecarga

Depois de ter sido conseguido controlar a entrada de escoamento nos coletores foi necessário perceber como funcionaria a rede caso os coletores entrassem em carga. Assim, efetuaram-se alguns testes, tendo-se concluído que caso o sistema entrasse em carga o caudal não subia à superfície. Percebeu-se então que em cada ligação era necessário novamente um “outlet”, sendo que este funcionaria no sentido inverso dos apresentados anteriormente. A representação desta simplificação da rede apresenta-se na Figura 4.6:

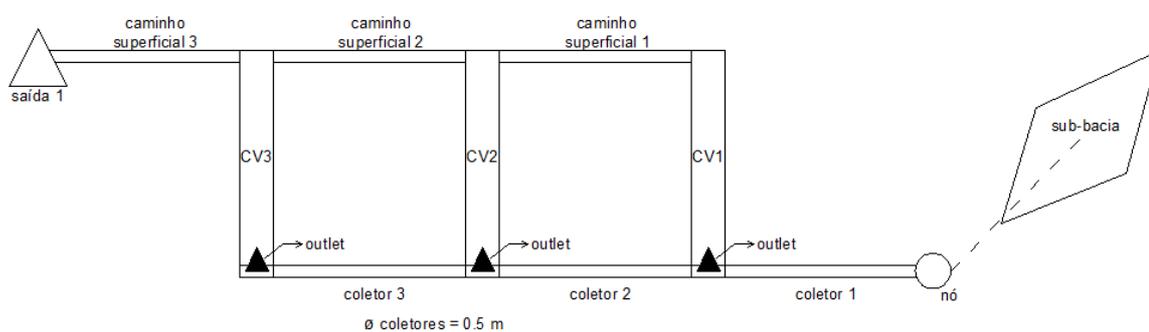


Figura 4.6 – Modelo simplificado com “outlets” de controlo de saída

Pode observar-se na Figura 4.7 que este modelo funciona da forma desejada, subindo o caudal para a superfície quando o sistema entra em carga.

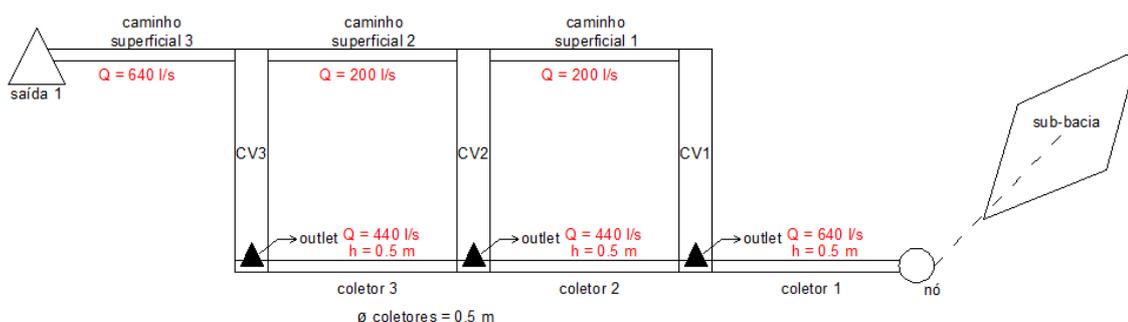


Figura 4.7 – Resultados do modelo simplificado com “outlets” de controlo de saída

Depois de realizados todos os referidos testes e de se perceber que se verifica a lei da continuidade em todos os nós, juntaram-se os conceitos apreendidos nos vários testes e criou-se a rede simplificada final, apresentada na Figura 4.8.

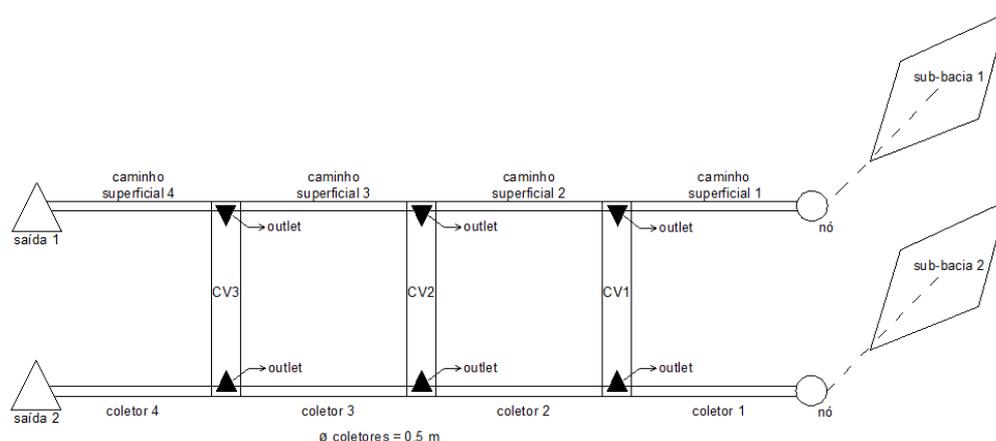


Figura 4.8 – Modelo simplificado final

Construído o modelo simplificado final testou-se o seu funcionamento, visto que este engloba agora num só modelo todas as componentes que anteriormente tinham sido testadas separadamente. Percebeu-se que este funcionava de uma forma correta, tendo então sido “transferido” o seu conceito para a rede da zona em estudo. Apresenta-se na Figura 4.9 a representação em planta de um pequeno trecho da rede após as alterações finais.

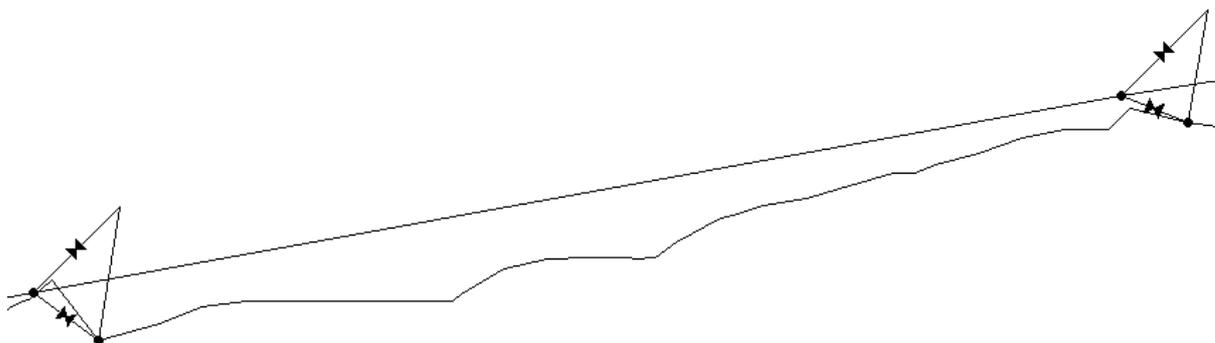


Figura 4.9 – Representação em planta de um trecho da rede final no SWMM´

4.3 Aplicação do conceito de Drenagem Dual ao Caso de Estudo

4.3.1 Introdução

Efetuararam-se então as alterações necessárias ao bom funcionamento da rede e correram-se alguns testes de modo a que fosse possível perceber se esta se encontrava realmente nas condições desejadas. Adotaram-se para estes testes chuvadas com 3 períodos de retorno diferentes, 5, 20 e 100 anos, na expectativa de se obter diferentes alturas de água resultantes de cada uma destas chuvadas. Seria de esperar que para a chuvada de 5 anos os níveis de água fossem baixos, tal como para 100 anos se esperaria que os níveis de água fossem elevados.

Depois de realizados os referidos testes analisou-se os níveis de água em dois pontos distintos, junto da Praça 8 de Maio e junto da Praça da República. Obtiveram-se resultados que foram comparados com os valores da chuvada de 9 de Junho de 2006 tendo-se verificado que estes mostravam um valor de caudal do qual resultaria uma cheia como a verificada. Como seria de esperar também, o caudal resultante da chuvada com período de retorno de 100 anos é superior ao caudal quando a chuvada tem período de retorno de 5 ou de 20 anos. Os resultados obtidos apresentam-se nas Figuras seguintes.

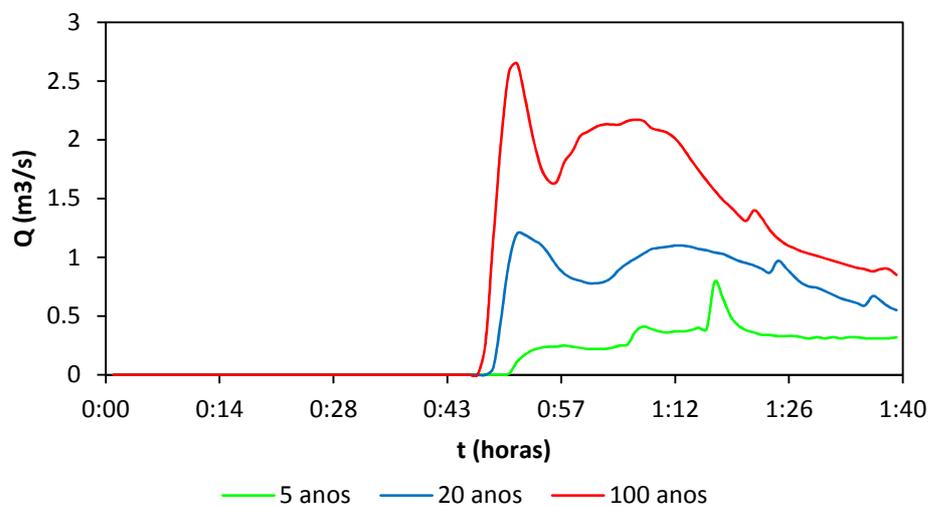


Figura 4.10 – Caudal junto à praça 8 de Maio

Analisando a Figura 4.10 pode ver-se que o caudal neste caminho superficial, junto da Praça 8 de Maio, é superior quando o período de recorrência da chuvada é igualmente superior.

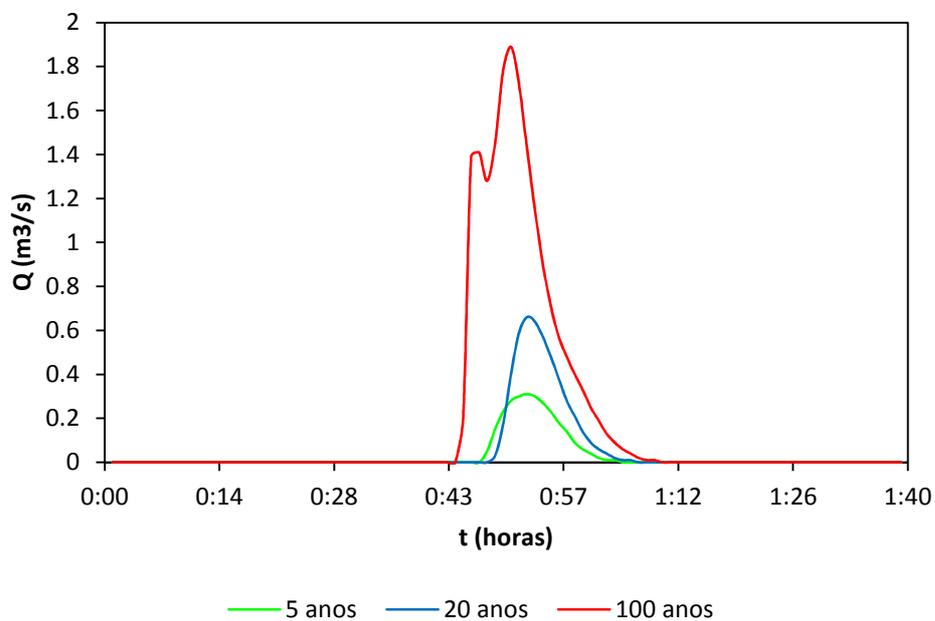


Figura 4.11 – Caudal junto à Praça da República

Prestando agora atenção à Figura 4.11 percebe-se que junto à Praça da República acontece o mesmo que junto da Praça 8 de Maio, ou seja, os níveis de água são superiores para uma chuvada com período de retorno de 100 anos em relação aos verificados para uma chuvada com Tr de 20 anos, sendo estes também superiores aos da chuvada com Tr de 5 anos.

Obteve-se, deste modo, um funcionamento correto da rede quando solicitada a responder a chuvadas com diferentes períodos de retorno.

Simulados os eventos pluviométricos correspondentes a cada período de retorno diferente, obtiveram-se os resultados, que permitiram elaborar os mapas de zonas inundáveis e os mapas de risco.

4.3.2 Mapas de zonas inundáveis

Após a obtenção dos resultados através do SWMM foi possível elaborar os mapas de zonas inundáveis. Para isso foi usado como auxiliar o *software* ArcGIS. Neste *software* tinha-se já a representação dos vários edifícios existentes na zona em estudo, tendo estes dados sido fornecidos pela Câmara Municipal de Coimbra. Esta representação era feita no plano, tendo sido trabalhada para surgir a 3D, juntamente com o modelo digital de terreno. A Figura 4.12 mostra a edificação da zona crítica da zona em estudo:

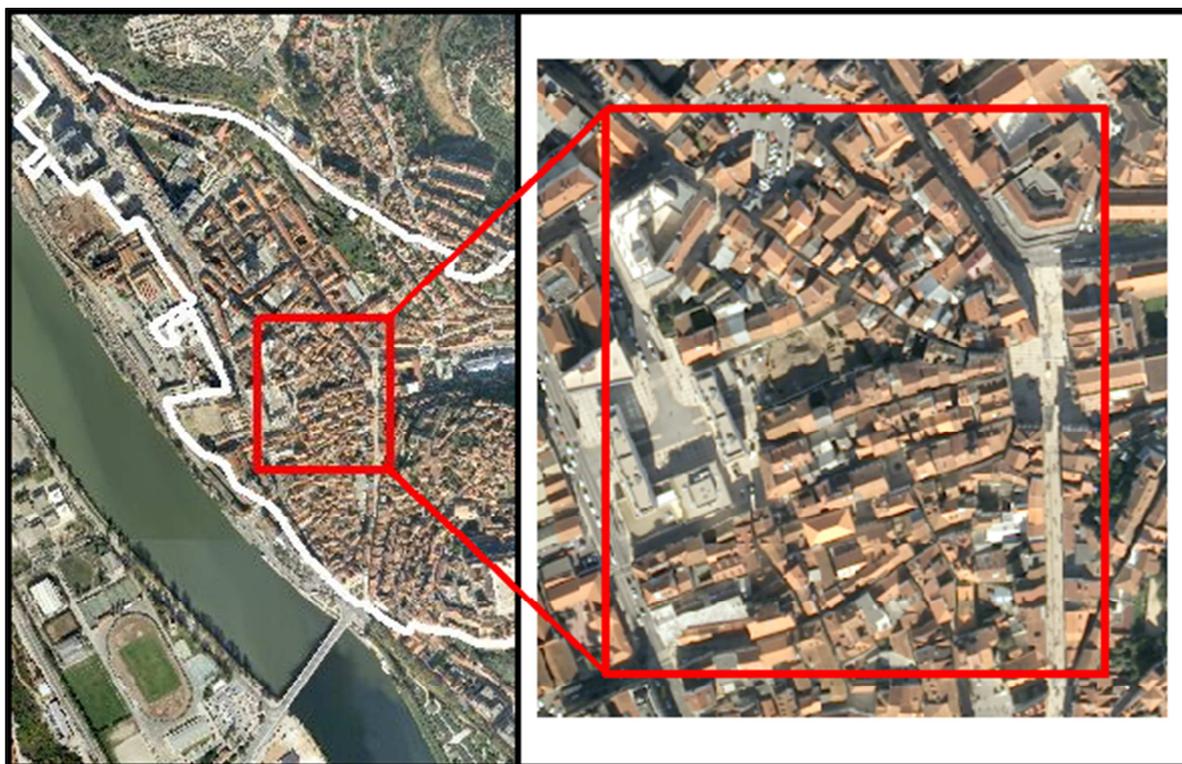


Figura 4.12 – Edifícios presentes na zona crítica da zona em estudo

Com o modelo digital do terreno foi possível, através da utilização da metodologia AOFD, gerar as zonas de acumulação de água, bastante importantes para a realização do trabalho proposto. Estas zonas apresentam-se juntamente com a representação dos edifícios nas Figuras seguintes, mostrando-se na Figura 4.13 uma parte da zona em estudo e na Figura 4.14 a zona crítica da zona em estudo com maior pormenor:

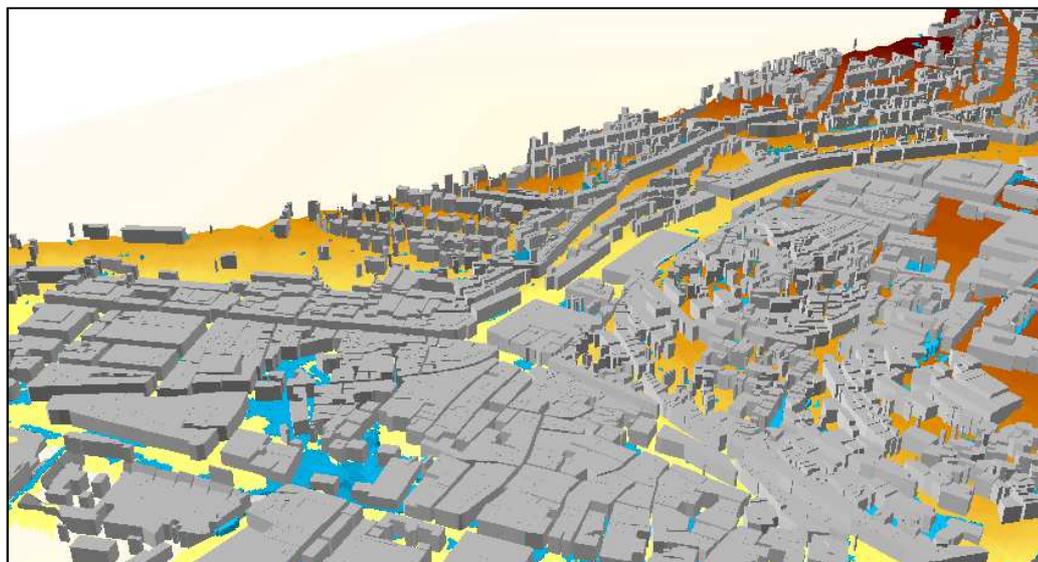


Figura 4.13 – Edifícios e zonas de acumulação de água na área em estudo



Figura 4.14 – Edifícios e zonas de acumulação de água na área crítica

Tendo esta representação é possível saber quais os edifícios que são afetados pelas zonas de acumulação de água, através da interseção das mesmas com os edifícios. Isto é importante para se poder cruzar os resultados obtidos nas simulações hidráulicas com essas interseções, através do qual se percebe qual a altura de água que afeta cada edifício. Estas interseções são representadas (a preto) na Figura 4.15:

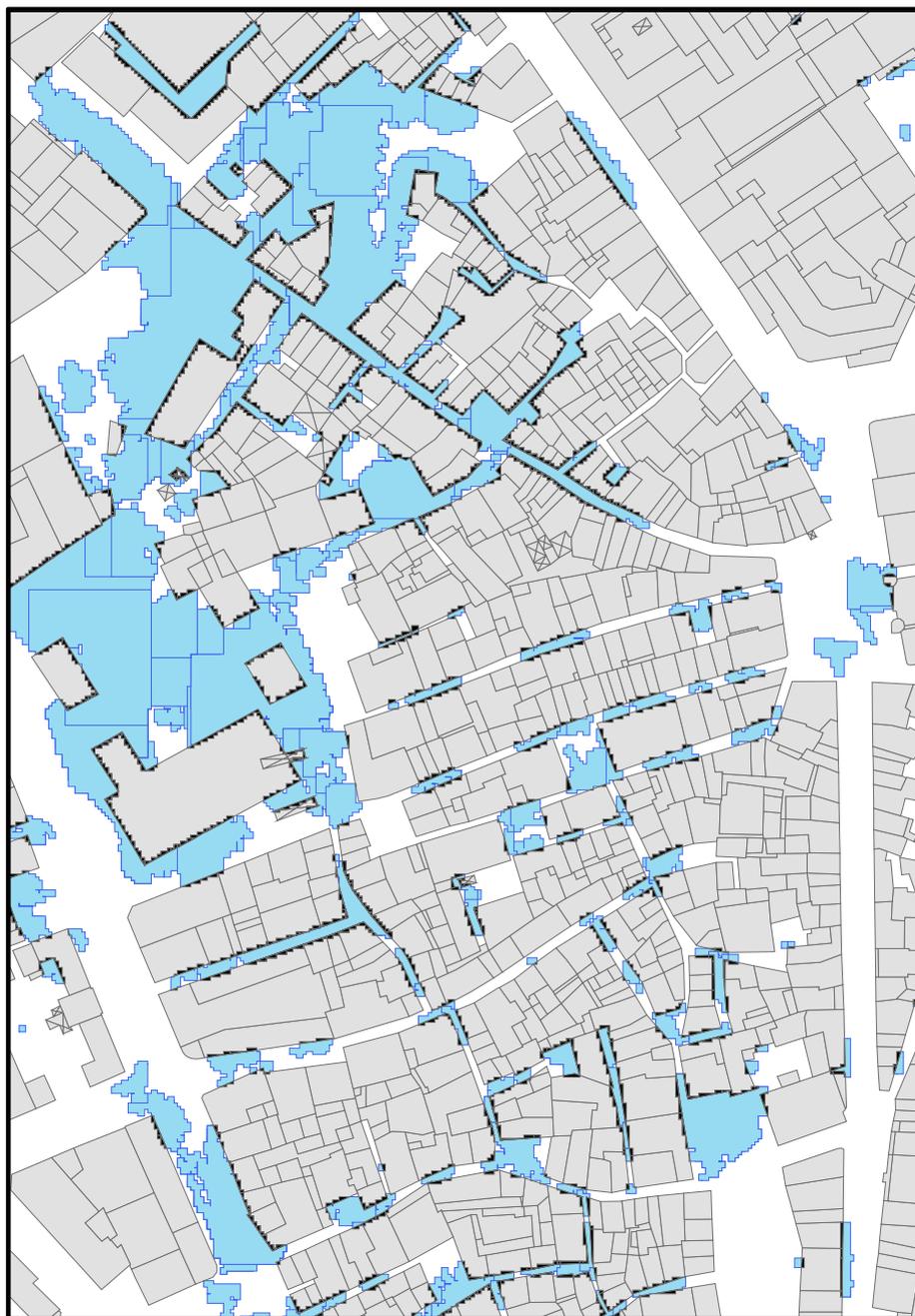


Figura 4.15 – Interseções das zonas de acumulação de água com os edifícios

Ao saber quais as zonas de acumulação de água que intersectam cada edifício pode-se, como já referido, associar a cada infraestrutura uma altura de água pela qual esta é afetada. No entanto, neste aspeto é necessário ter um cuidado muito particular devido ao facto de existirem em muitos casos mais do que uma zona de acumulação de água (*pond*) a intersectar o mesmo edifício, o que faz com que seja necessário analisar qual dessas zonas de acumulação tem maior impacto sobre o edifício, ou seja, qual delas tem uma altura de água maior.

Depois de feita a referida filtragem dos resultados de modo a que apenas se considere a máxima altura de água que intersecta cada um dos edifícios avançou-se para a elaboração dos mapas de zonas inundáveis.

Na elaboração destes mapas foi usada uma divisão por classes de altura água correspondendo à cor verde uma altura baixa e à cor vermelho-escuro uma altura bastante alta. Classes intermédias tomam as cores amarelo, laranja e vermelho. Cada edifício afetado em caso de inundação surge, então, com a cor indicativa da classe de altura de água que atinge essa infraestrutura. Caso não seja afetado em caso de inundação, surge a cor cinzenta.

Apresentam-se, assim, os dois mapas de zonas inundáveis resultantes de dois eventos de precipitação com períodos de retorno diferentes, um de 20 anos (Figura 4.16) e outro de 100 anos (Figura 4.17). Com base nestes mapas será possível, posteriormente, elaborar os mapas de risco de inundação.

Além destes mapas apresenta-se ainda um mapa que mostra quais os edifícios cuja altura de água pela qual são afetados pertence a uma classe diferente quando a chuvada deixa de ter Tr de 20 anos e passa a ter de 100 anos. Isto não implica, no entanto, que aqueles que não mudam de classe sejam afetados igualmente, podem ser afetados por um valor diferente mas que se encontre dentro do mesmo intervalo. Este mapa apresenta-se na Figura 4.18.

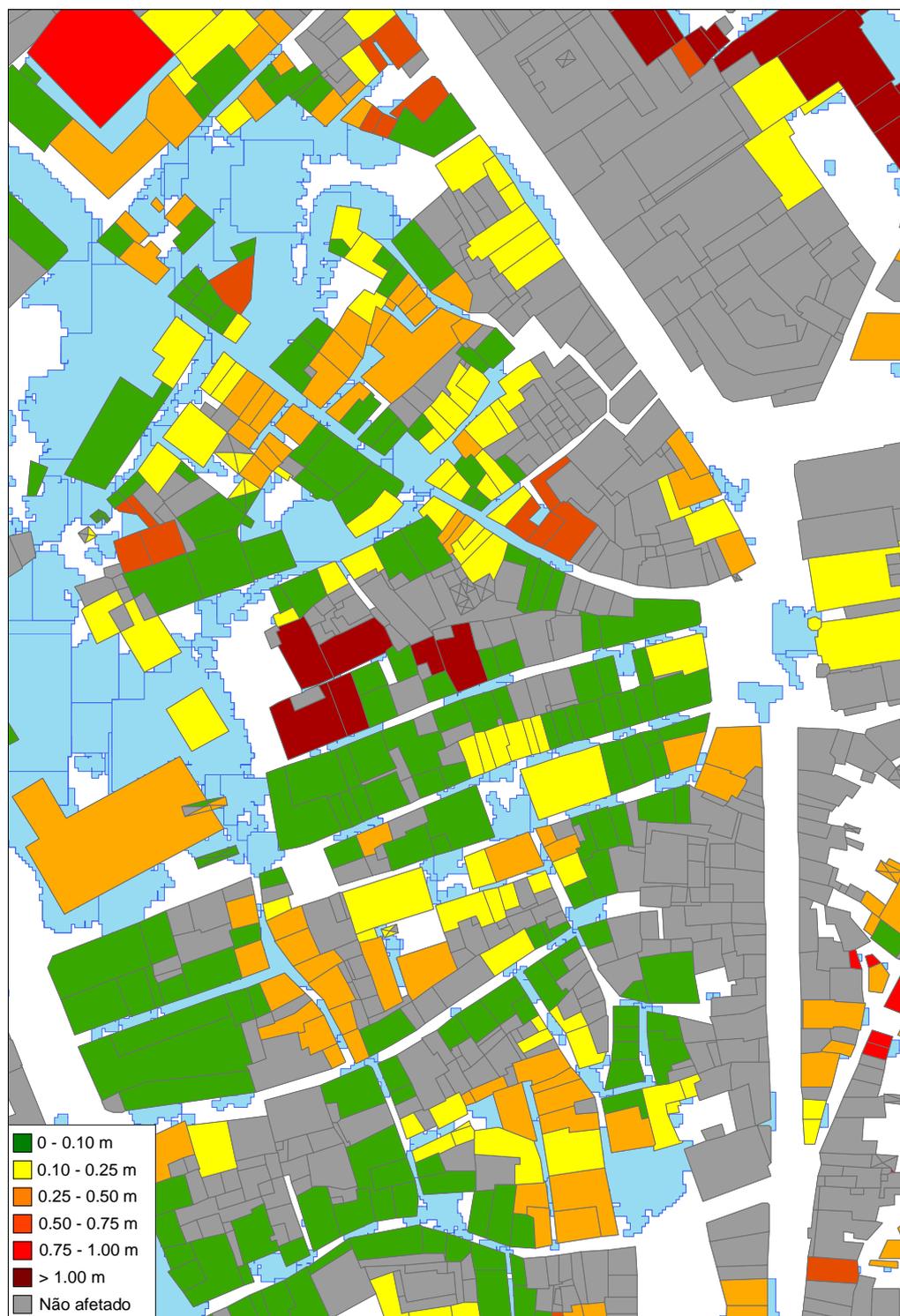


Figura 4.16 – Mapa de zonas inundáveis (Tr de 20 anos)

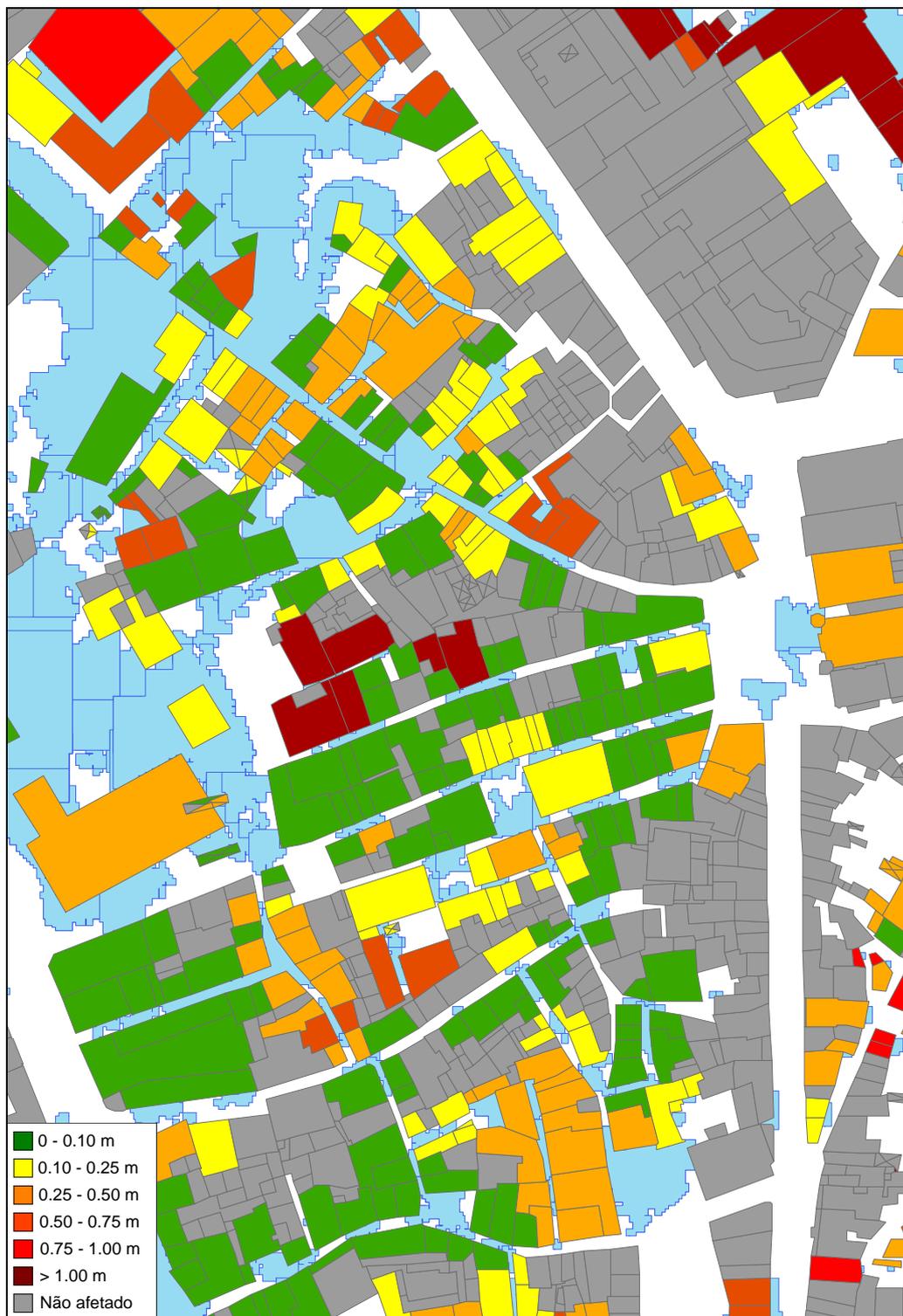


Figura 4.17 – Mapa de zonas inundáveis (Tr de 100 anos)



Figura 4.18 – Edifícios cuja classe de risco modificou de acordo com os resultados para Tr de 20 e de 100 anos

Fazendo uma análise aos resultados obtidos nos mapas de zonas inundáveis percebemos que a maior parte dos edifícios que são afetados são atingidos por uma altura de água pequena. No entanto, quer no mapa associado a uma chuvada com Tr de 20 anos quer no de Tr de 100 anos, verifica-se um número que se pode dizer considerável de edifícios na classe 0.25 a 0.50 m. O impacto de uma inundação sobre estes edifícios já será preocupante. Sofrendo um impacto maior do que o referido surgem ainda alguns edifícios, em maior número, como é natural, para a chuvada com período de retorno de 100 anos. Estas serão, então, as infraestruturas mais suscetíveis a sofrer danos mais graves em caso de uma inundação.

4.3.3 Mapas de risco de inundação

Depois de se ter os mapas de zonas inundáveis é possível obter os mapas de risco de inundação. Estes mapas expressarão o risco de inundação de uma forma quantitativa, como já foi referido. Para a sua elaboração é necessário uma curva de custo que traduza monetariamente o valor dos danos provocados por uma inundação, curva esta que foi apresentada no capítulo anterior.

Com a função de custo é possível elaborar o mapa de risco que traduz, de uma forma quantitativa, o risco inerente a uma inundação. Ou seja, cada edifício é classificado consoante o intervalo de custo resultante dos danos provocados nesse mesmo edifício aquando de uma inundação.

As classes definidas para cada intervalo de custo foram elaboradas de acordo com as classes apresentadas anteriormente para os mapas de zonas inundáveis, ou seja, a cada altura de água limite de cada classe fez-se corresponder o respetivo custo, sendo esses os limites das classes de custo.

Assim, e como se pode observar na Figura 4.19 e na Figura 4.20 apresentadas de seguida, cada edifício possui uma classificação consoante o custo dos danos provocados por uma inundação. Edifícios com cor roxa ou azul-escura são os que têm um custo mais elevado por m², visto serem os afetados por uma altura de água maior. Por outro lado, os edifícios apresentados com cores mais claras são aqueles que apresentam um menor custo por m² resultante dos danos.

Tal como nos mapas de zonas inundáveis, e visto os mapas de risco apresentados terem por base esses mapas, percebe-se alguma diferença entre o mapa que diz respeito a uma inundação resultante de um evento de precipitação com período de retorno de 20 anos em relação ao que resulta de um evento com Tr de 100 anos.

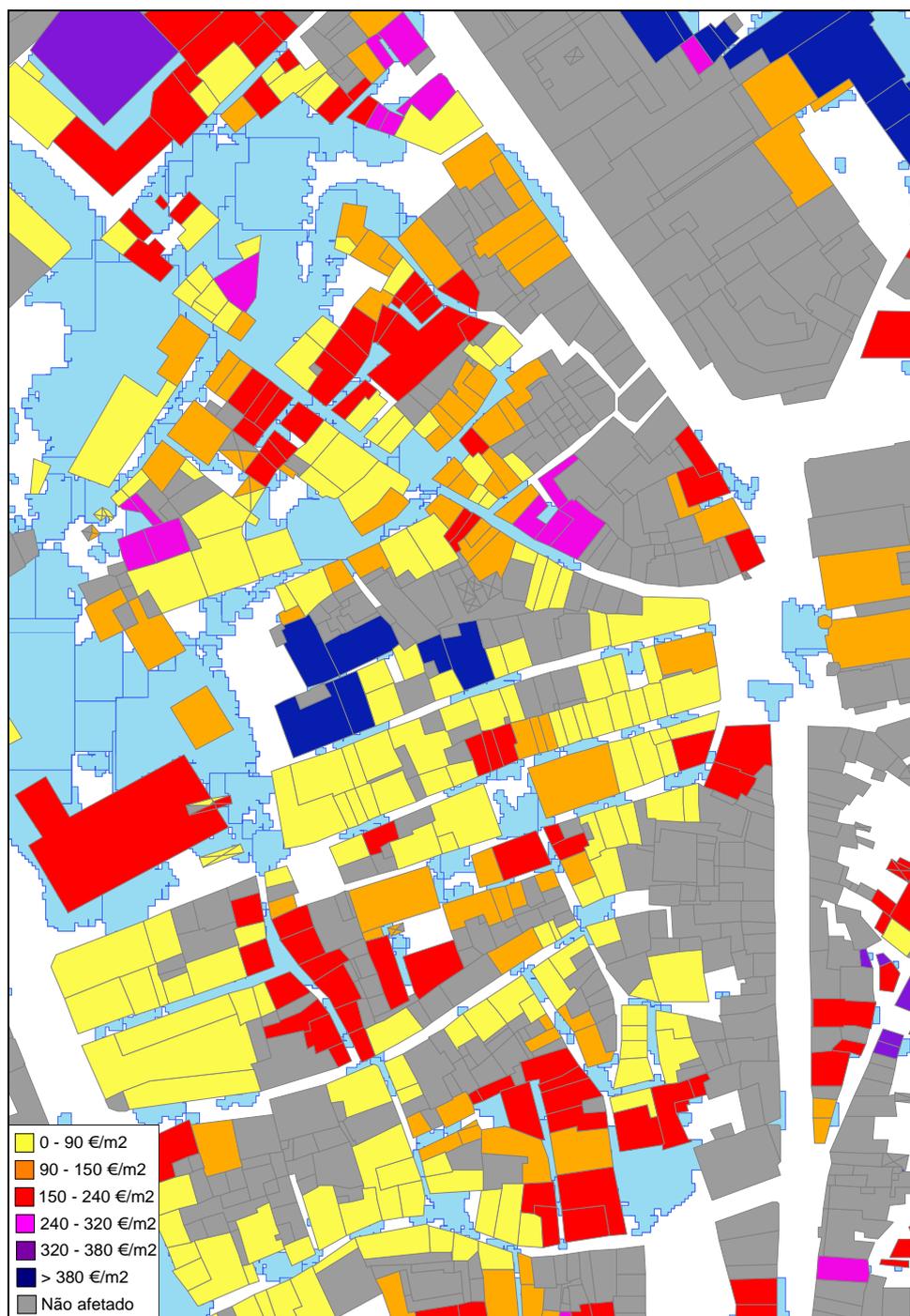


Figura 4.19 – Mapa de risco de inundação, expresso em €/m² (Tr de 20 anos)

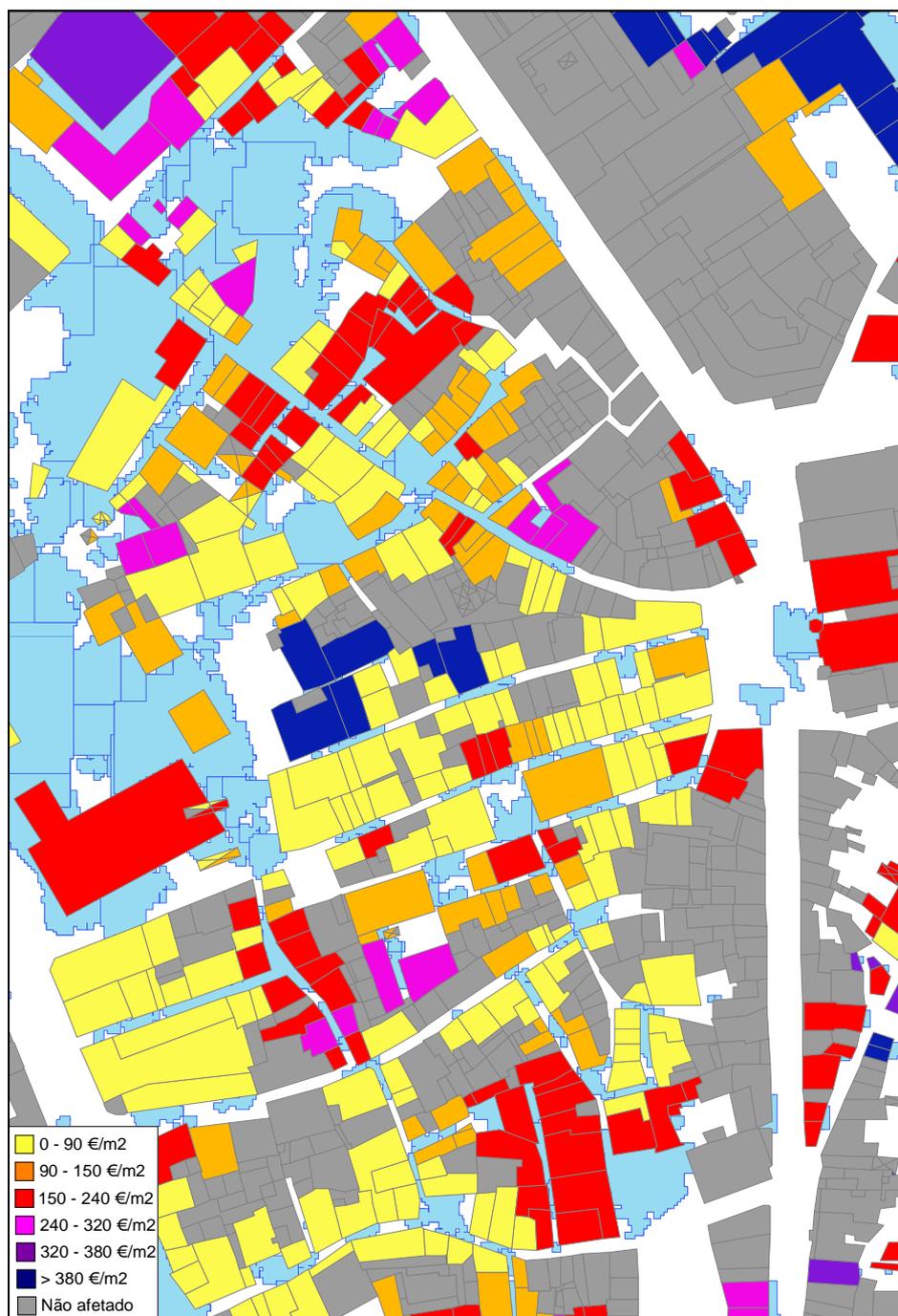


Figura 4.20 – Mapa de risco de inundação, expresso em €/m² (Tr de 100 anos)

Além dos mapas de risco apresentados anteriormente é importante ainda elaborar um mapa que traduza o risco através do custo total dos danos. Estes mapas, apresentados de seguida, podem ser vistos como um complemento aos anteriores, pois resultam da multiplicação dos valores de custo por esses mapas traduzidos pela área de cada infraestrutura.

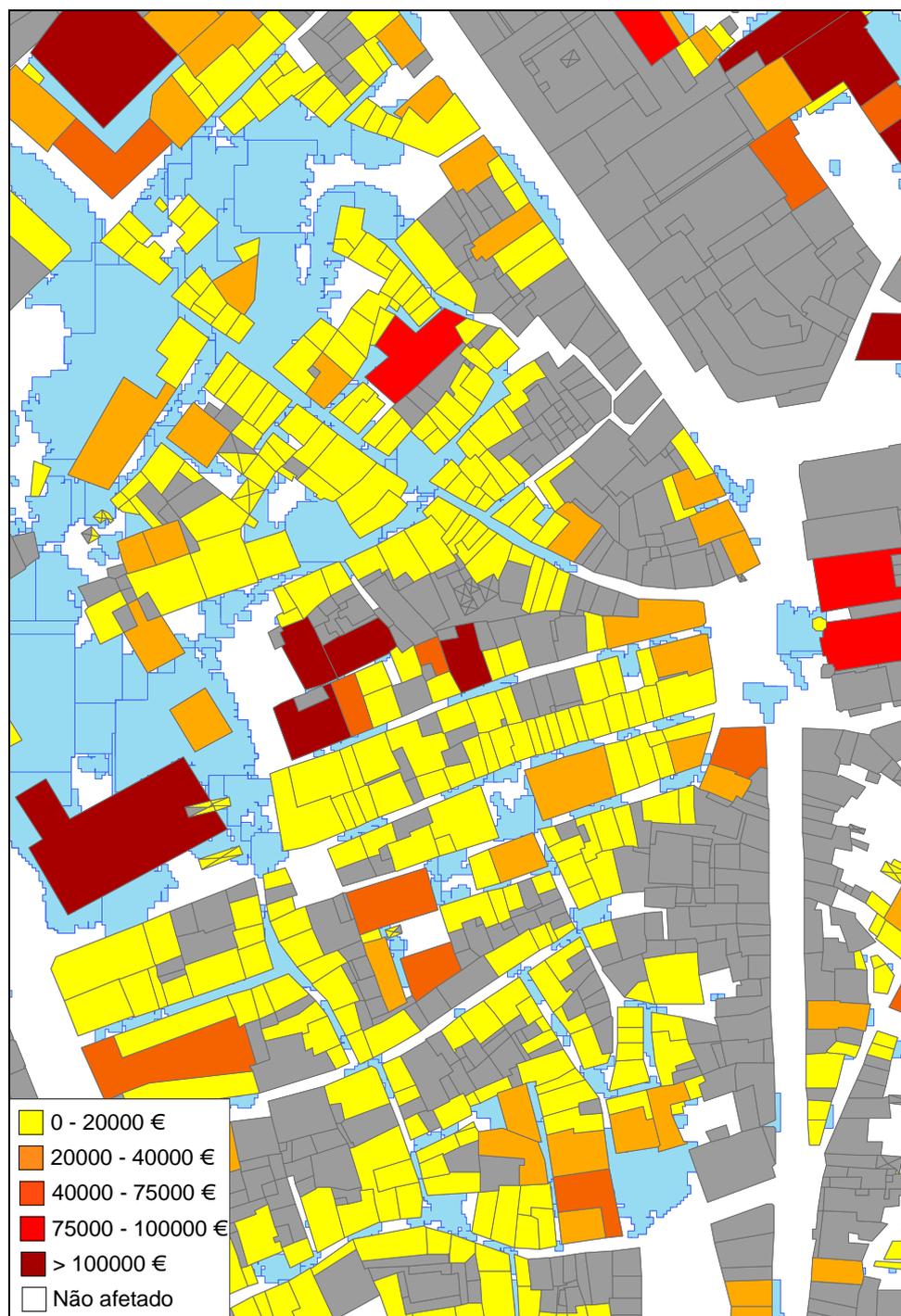


Figura 4.21 – Mapa de risco de inundação, expresso em € (Tr de 20 anos)

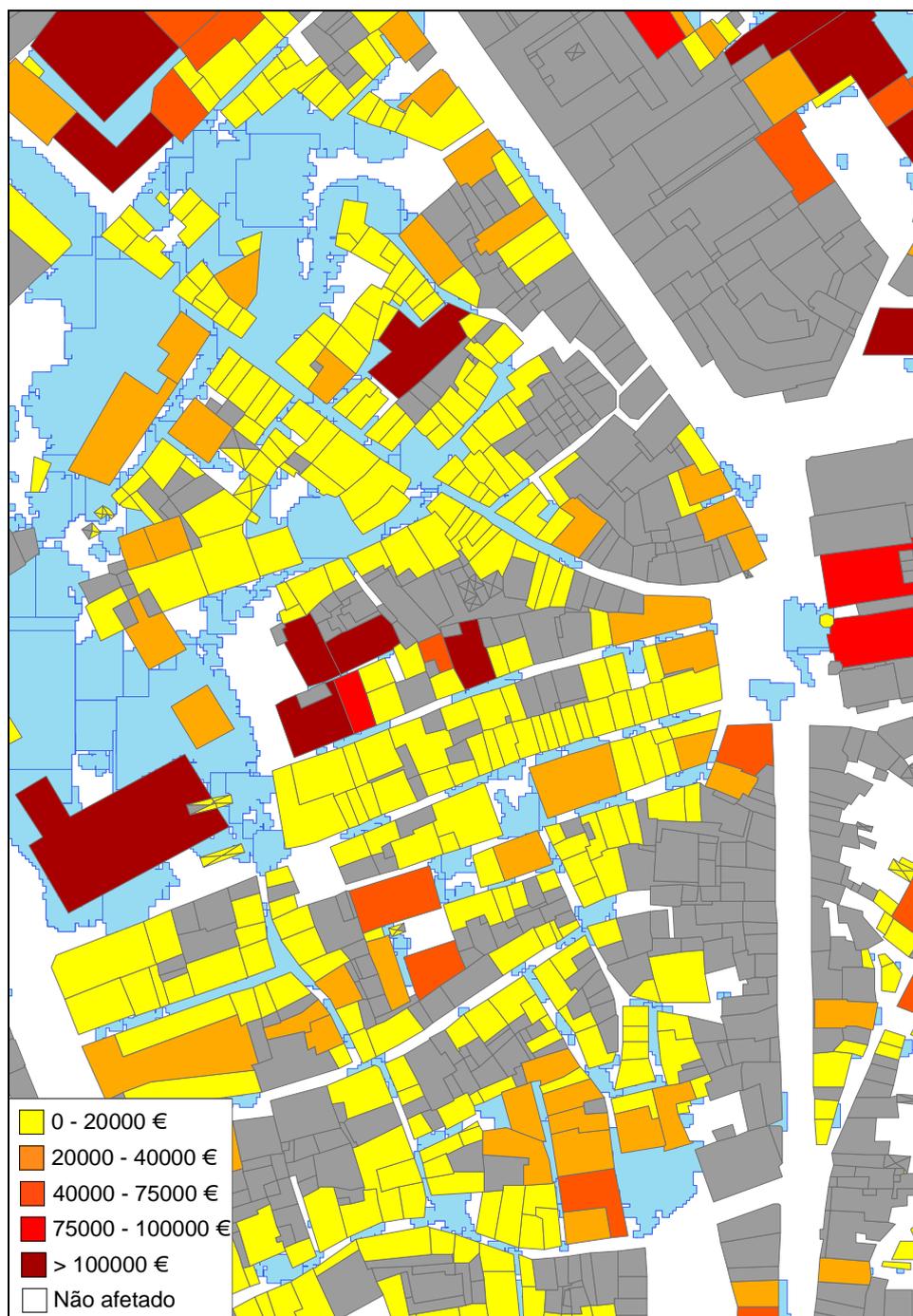


Figura 4.22 – Mapa de risco de inundação, expresso em € (Tr de 100 anos)

Nestes mapas percebe-se que, apesar de alguns edifícios terem um custo por m^2 baixo, o valor monetário total dos danos provocados por uma inundação pode ser elevado, crescendo proporcionalmente ao aumento de área.

Ao analisar os mapas de risco apresentados percebe-se que, como é natural, quando surge uma inundação resultante de um evento de precipitação com período de retorno baixo os danos são, na globalidade, menores, visto esta resultar de níveis de precipitação mais baixos quando comparada com chuvadas com maiores períodos de retorno. Esta diferença não é, no entanto, muito acentuada. Uma das razões que pode explicar isso é o facto de existirem classes de altura de água, o que faz com que, como já foi referido anteriormente, vários edifícios apesar de serem afetados por uma altura de água um pouco diferente quando ocorre um evento de precipitação com Tr de 20 anos e um com Tr de 100 anos, se encontrem dentro da mesma classe, sendo o resultado final igual.

Atentando aos mapas de risco que expressam o risco em função do custo total pode concluir-se, tal como explicitado anteriormente, que o facto de um edifício ser afetado por um nível de água baixo não implica que o custo total dos danos seja também ele baixo, visto que este valor depende da área do edifício. Assim, edifícios cuja área é grande apresentarão um custo total elevado, mesmo que não sejam atingidos por um nível de água elevado. Edifícios menores, a menos que sejam afetados por uma altura de água elevada, não apresentarão portanto um custo muito elevado, visto terem uma área reduzida.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

As inundações são cada vez mais um fator preocupante para a população uma vez que têm vindo a tornar-se mais frequentes ao longo das últimas décadas. A crescente urbanização de espaços anteriormente permeáveis faz com que o escoamento à superfície possa aumentar, gerando assim inundações.

Aliado ao fator referido, o não acompanhamento na evolução dos sistemas de drenagem em relação ao aumento da sua solicitação faz com que se gerem inundações urbanas. É, por isso, importante o estudo destes fenómenos de modo a que a população possa estar avisada e preparada para possíveis situações de inundação.

A Diretiva 2007/60/CE impõe a necessidade da realização de mapas de zonas inundáveis e de mapas de risco de inundação visto que cada vez mais é importante estudar as inundações e o impacto que estas têm nas Comunidades.

O conceito de drenagem dual é bastante importante no estudo de inundações urbanas, pois as ruas funcionam como um sistema de drenagem que interage com o sistema de coletores. Por vezes também as inundações não surgem apenas devido à não capacidade de resposta dos coletores mas porque o escoamento superficial não entra por completo para as condutas, podendo assim acumular-se à superfície.

No trabalho realizado foi modelado um sistema de drenagem dual, o que se verificou ser bastante importante para este estudo visto que o que na realidade acontece, e sendo a realidade uma verdade incontornável, é que as inundações na zona em estudo, particularmente na zona crítica, se dão sem que os coletores entrem em carga, devido ao facto da água não entrar na totalidade desde a superfície para os coletores.

Além do estudo do sistema de drenagem dual foi também importante fazer o referido controlo da entrada de água desde a superfície para os coletores, e igualmente a sua saída dos coletores para a superfície em caso de sobrecarga do sistema. Tendo sido conseguido esse controlo foi mais um passo bastante importante rumo ao objetivo final que era realizar mapas de zonas inundáveis e mapas de risco de inundação.

Com o sistema de drenagem modelado e a funcionar corretamente foi possível simular diferentes chuvadas e daí elaborar os referidos mapas, que ajudam a prever possíveis consequências de uma inundação. Os mapas realizados neste trabalho indicam quais as zonas,

numa área considerada como crítica na zona central de Coimbra e para inundações resultantes de chuvadas com períodos de retorno de 20 e 100 anos, que são mais propícias a inundar e cujos danos provocados resultam em maiores custos.

Focalizando a análise apenas nos mapas de risco pode concluir-se que um edifício, apesar de afetado por uma altura de água superior em relação a um outro, não terá necessariamente um custo total referente aos danos provocados superior, visto que este depende da área da infraestrutura. Edifícios pequenos podem ser atingidos por uma altura de água elevada e o custo total ser, naturalmente, inferior ao custo total dos danos num edifício de grandes dimensões.

Em suma, a metodologia realizada neste trabalho no âmbito da quantificação do risco de inundação deu a perceber a importância da realização de mapas de zonas inundáveis e mapas de risco de inundação, os quais podem ser utilizados na prevenção das populações para futuras inundações. Além disso, aprofundou-se também o conceito de drenagem dual no *software* SWMM, muito pouco desenvolvido até à data. Este trabalho pode assim servir como um auxílio a futuros trabalhos de modelação de sistemas de drenagem dual com recurso a este *software*.

5.2 Trabalhos Futuros

Na sequência deste trabalho poderão ser realizados trabalhos futuros no âmbito da elaboração de mapas de risco, também de uma forma quantitativa, para outros tipos de estruturas ou mesmo para as ruas, tentando quantificar o custo dos prejuízos recorrente de uma inundação nas várias ruas da cidade. Poderão também ser analisados com maior pormenor os edifícios da zona em estudo e ser feita uma distinção entre edifícios habitacionais e edifícios comerciais, adaptando as curvas de custo para os diferentes tipos de utilização dos edifícios.

Outro trabalho que pode ser elaborado consiste na realização deste mesmo estudo mas utilizando uma modelação 1D/2D em vez de 1D/1D, ou a utilização de um outro *software* para a realização dessa modelação diferente do SWMM, e a partir dos resultados obtidos compará-los com os obtidos neste trabalho.

Um trabalho interessante poderia também ser efetuar um estudo idêntico ao desenvolvido nesta dissertação conjugado com o trabalho desenvolvido numa outra dissertação que testa o benefício do uso de SUDS na atenuação de inundações.

Elaborar um estudo em que se tente otimizar a localização de SUDS com base nos custos de construção desses elementos e a diminuição do risco que daí advém poderia também ser interessante para um trabalho futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adeyemo, O. J. (2007). Surface Runoff Modelling for Pluvial Urban Flooding under Extreme Conditions. Tese de Mestrado, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

Allitt, R., Blanksby, J., Djordjevic, S., Maksimovic, C. e Stewart, D. (2009). Investigations into 1D-1D and 1D-2D Urban Flood Modelling. WaPUG Autumn Conference, Blackpool.

Balmforth, D., Digman, C., Kellagher, R. e Butler, D. (2006). Designing for exceedance in urban drainage - good practice. London, CIRIA.

BancoDePortugal@ (2013). <http://www.bportugal.pt/ptPT/Estatisticas/Dominios%20Estatisticos/EstatisticasCambiais/Paginas/Conversor.aspx>. Banco de Portugal (acedido em 28/06/2013).

Betâmio de Almeida, A. (2004). Incertezas e riscos no contexto da Engenharia. 7º Congresso da Água, LNEC, Lisboa.

Burian, S. J., Nix, S. J., Durrans, S. R., Pitt, R. E., Fan, C. e Field, R. (1999). "Historical Development of Wet-Weather Flow Management." *Journal of Water Resources Planning and Management* 125(1): 3-11.

Butler, D. e Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. Oxon, Spon Press.

Chow, V. T., Maidment, D. R. e Mays, L. W. (1988). *Design Storms - Chapter 14*. em: *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company.

Djordjevic, S., Prodanovic, D., Maksimovic, C., Ivetic, M. e Savic, D. (2005). "SIPSON - Simulation of interaction between pipe flow and surface overland flow in networks." *Water Science and Technology* 52(5): 275-283.

EA@ (2012). www.environment-agency.gov.uk/research/library/publications/115631.aspx. Environment Agency - UK (acedido em 25/03/2013).

ERM@ (2010). www.ircrisk.com/blognet/post/2010/06/09/Prioritizing-Risks.aspx. ERM Risk and Safety (acedido em 25/03/2013).

Estellés, M. A. A. (2010). Analysis of rainfall data and rainfall forecasting techniques used as input for urban pluvial flood simulation and prediction. Tese de Mestrado, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

Europeu, P. e Europeia, C. d. U. (2007). "Diretiva 2007/60/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2007 relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações." *Jornal Oficial da União Europeia*.

Exeter@ (2010). <http://emps.exeter.ac.uk/engineering/research/cws/research/flood-risk/rapids.html>. University of Exeter (acedido em 16/07/2013).

Furumai, H. e Matsuura, M. (2006). Utility of advanced runoff simulation for development of inundation hazard map and comprehensive flood control in highly urbanized region. IWA 5th World Water Congress and Exhibition, Pequim.

Hora, S. B. e Gomes, R. L. (2009). "Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/ba." *Sociedade e Natureza (Online)* 21(2): 57-75.

Leandro, J. E. T. (2008). *Advanced Modelling of Flooding in Urban Areas Integrated 1D/1D and 1D/2D Models*. Tese de Doutoramento, University of Exeter.

Leitão, J. P., Almeida, M. C., Simões, N. E. e Martins, A. (2012). Methodology for qualitative urban flooding risk assessment. 9th International Conference on Urban Drainage Modelling, Belgrado.

Leitão, J. P., Matos, J. S., Maksimovic, C. e Prodanovic, D. (2008). Modelos de simulação do escoamento superficial em meio urbano - potencialidades e limitações. 13º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Covilhã.

Leitão, J. P. C. (2009). *Enhancement of digital elevation models and overland flow path delineation methods for advanced urban flood modelling*. Tese de Doutoramento, Department of Civil and Environmental Engineering - Imperial College, Londres.

Machado, M. L., Nascimento, N., Baptista, M., Gonçalves, M. e Silva, A. (2005). "Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia." *Revista de gestión del agua de América Latina* 2(1): 32-52.

Maksimovic, C., Prodanović, D., Boonya-Aroonnet, S., Leitão, J. P., Djordjević, S. e Allitt, R. (2009). "Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding." *Journal of Hydraulic Research* 47(4): 512-523.

Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B. e Djordjevic, S. (2004). "Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding." *Journal of Hydrology* 299: 284-299.

Matos, J. S. (2003). "Aspetos Históricos a Atuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano." *Revista Engenharia Civil* 16: 13-23.

McDonald, A. J. (2010). An Assessment of a Depth Monitoring Programme: Development of Depth Discharge Relationships and Understanding Data Uncertainty and Error. Tese de Mestrado, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

MohenjoDaro@ (2008). www.mohenjodaro.net/mohenjodaroessay.html. Mohenjo-Daro An Ancient Indus Valley Metropolis (acedido em 21/03/2013).

NRCS@ (2013). www.wy.nrcs.usda.gov/wygis/lidar.html. Natural Resources Conservation Service (acedido em 13/03/2013).

Pedroso de Lima, J. (2013a). Cap. 1 - Introdução. em: Hidrologia Urbana - Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais Urbanas. J. Pedroso de Lima (ed.). Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra.

Pedroso de Lima, J., Sá Marques, A. e Sousa, J. (2013b). Cap. 2 - Sistemas de Drenagem. em: Hidrologia Urbana - Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais Urbanas. J. Pedroso de Lima (ed.). Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra.

Portela, M. M., Marques, P. e Carvalho, F. F. d. (2000). Hietogramas de Projeto para a análise de cheias baseada no modelo do hidrograma unitário do Soil Conservation Service (SCS). 5º Congresso da Água - A água e o desenvolvimento sustentável: Desafios para o novo Século, Lisboa.

Rocha, J. S. (1998). O risco das inundações e a sua gestão. Uma visão Nacional e uma visão Europeia. 4º Congresso da APRH, Lisboa.

Rossmann, L. A. (2010). Storm Water Management Model - User's Manual, Version 5.0. Cincinnati, National Risk Management Research Laboratory.

Ryu, J. (2008). Decision Support for Sewer Flood Risk Management. Tese de Doutoramento, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

Sá Marques, A., Simões, N. E. e Pina, R. (2010). Estudo Hidrológico e Hidráulico da Ribeira das Hortas em Santa Comba Dão. Relatório Técnico - Itecons, Coimbra.

Sá Marques, A., Simões, N. E. e Pina, R. (2013). Cap. 3 - Simulação em Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais. em: Hidrologia Urbana - Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais Urbanas. J. Pedroso de Lima (ed.). Lisboa, ERSAR e Universidade de Coimbra.

Sá Marques, A. e Sousa, J. (2008). Hidráulica Urbana - Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais. Coimbra, Imprensa da Universidade de Coimbra.

Simões, N. E. (2012). Urban Pluvial Flood Forecasting. Tese de Doutoramento, Department of Civil Engineering - Imperial College, Londres.

Smith, M. B. (2006). "Comment on 'Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems'." *Journal of Hydrology* 317(3-4): 355-363.

SWMM@ (2013). www.epa.gov/athens/wwqts/html/swmm.html. Storm Water Management Model (acedido em 03/03/2013).

TheWorldBank@ (2013). <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>. The World Bank Group (acedido em 28/06/2013).

Tucci, C. (1998). Modelos Hidrológicos. Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS/ABRH.