



João Luís Esteves Vairinhos

**MODELAÇÃO HIDRÁULICA DE  
SISTEMAS URBANOS DE  
DRENAGEM SUSTENTÁVEL:  
APLICAÇÃO DE SOLUÇÕES DE CONTROLO  
NA ORIGEM A UM CASO DE ESTUDO**

**HYDRAULIC MODELLING OF SUSTAINABLE URBAN DRAINAGE  
SYSTEMS: APPLICATION OF SOURCE CONTROL SOLUTIONS TO A  
CASE STUDY**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,  
orientada pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques.

Coimbra, 8 de setembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



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

João Luís Esteves Vairinhos

# **MODELAÇÃO HIDRÁULICA DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEL: aplicação de soluções de controlo na origem a um caso de estudo**

## **Hydraulic Modelling of Sustainable Urban Drainage Systems: application of source control solutions to a case study**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,  
orientada pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões e Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer  
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões  
que possam surgir

Coimbra, 8 de setembro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Deixo aqui os meus agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação e para o sucesso do meu percurso académico e pessoal.

Aos meus orientadores, o Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques e o Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões pela orientação, disponibilidade e apoio.

À minha família pelo apoio incondicional e pela confiança em mim depositada. Devo-vos tudo o que sou hoje. Muito obrigado aos meus pais, às minhas irmãs, aos meus avós, aos meus tios e primos. Todos foram imprescindíveis para o sucesso do meu percurso académico e pessoal.

À Carolina pelo apoio, pela motivação, pela paciência e principalmente por todo o amor e carinho ao longo dos últimos anos.

Aos meus amigos de Lagos, aos de Coimbra, aos de toda a parte, um muito obrigado pela amizade, pelo companheirismo, por tudo. Ao Laboratório 14 pela companhia, amizade e paciência.

Agradeço ainda à Universidade de Coimbra pelo acolhimento e pela formação, foi um prazer fazer parte desta instituição.

## RESUMO

Com o crescimento populacional, as áreas urbanas e as emissões de gases de efeito de estufa aumentam consideravelmente. Isto tem consequências negativas em muitos aspetos, sendo um deles na drenagem das águas pluviais em meios urbanos. Devido à impermeabilização dos solos e ao aumento da frequência e intensidade dos eventos de precipitação, o risco de inundações em zonas urbanas aumenta, o que faz com que seja necessário responder a esse problema. É então que surgem os sistemas urbanos de drenagem sustentável, uma alternativa à drenagem tradicional que procura resolver os problemas existentes na drenagem urbana de uma forma ambientalmente e economicamente sustentável.

Esta dissertação pretende avaliar o potencial de alguns SUDS de controlo na origem na redução do escoamento superficial para um caso de estudo usando o *software* SWMM. Existem inúmeras técnicas de drenagem sustentável, ou sistemas urbanos de drenagem sustentável (SUDS), cada uma com as suas vantagens e desvantagens. No entanto, como é recomendado, deve-se encontrar uma solução o mais próximo possível da fonte, e só depois, se necessário, implementar soluções a jusante do sítio onde a chuva alcança o solo. Como tal este estudo foca-se na implementação de pavimentos permeáveis, depósitos de armazenamento de água pluvial e desconexões de telhado, que são técnicas de controlo na origem do escoamento de águas pluviais.

Os resultados demonstraram o impacto positivo da aplicação destes SUDS na redução da quantidade de escoamento e por consequência dos volumes de inundação. Os melhores resultados obtidos foram valores de 28,9 % de redução da quantidade de escoamento superficial e, por consequência, uma redução de 67 % nos volumes de inundação. Foram várias as câmaras de visita que deixaram de apresentar volumes de inundação mediante a aplicação dos diferentes tipos de SUDS e de um modo geral, em todas as situações foram obtidos resultados positivos para todas as câmaras de visita.

**Palavras-chave:** Drenagem Urbana Sustentável; SUDS; SWMM; Redução do Escoamento

## **ABSTRACT**

With the population growth, urban areas and greenhouse gases emissions increase considerably. This has negative consequences in many aspects, being one of them in urban stormwater drainage. Due to the waterproofing of soils and the increased frequency and intensity of precipitation events, the risk of flooding in urban areas increases, which makes it necessary to respond to this problem. It is then that urban systems of sustainable drainage arise, an alternative to drainage by conduits that seeks to solve the problems existing in urban drainage in an environmentally and economically sustainable way.

This dissertation aims to evaluate the impact of some sustainable drainage techniques of source control in the reduction of the flow and volume of the rainwater runoff for a case study using SWMM software. There are many sustainable drainage techniques, or sustainable urban drainage systems (SUDS), each with its advantages and disadvantages. However, as advised by Butler & Davies (2011), a solution must be found as close as possible to the source, and only then, if necessary, to implement solutions downstream of the site where rain reaches the ground. As such, this study focuses on the implementation of permeable pavements, rainwater storage tanks and roof disconnections, which are source control techniques of rainwater runoff.

The results showed the positive impact of the application of SUDS in reducing the amount of rainwater runoff and consequently of flood volumes. The best results were 28.9% reduction in the amount of surface runoff and, consequently, a reduction of 67% in flood volumes. There were several manholes that no longer has flood volumes by applying the different types of SUDS and in general, in all cases positive results were obtained for all manholes.

**Keywords:** Sustainable Urban Drainage; SUDS; SWMM; Runoff reduction.

## ÍNDICE

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Índice .....	iv
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Quadros .....	viii
Abreviaturas.....	x
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Estrutura.....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Drenagem Urbana .....	3
2.1.1 Efeitos da Urbanização na drenagem de águas pluviais.....	4
2.1.2 Efeitos das alterações climáticas na drenagem de águas pluviais .....	5
2.1.3 Drenagem Urbana Sustentável .....	7
2.2 SUDS .....	9
2.2.1 Benefícios dos SUDS .....	10
2.2.2 Tipos de SUDS .....	11
2.2.3 Cadeia de Gestão dos SUDS .....	13
2.3 Modelação de Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais .....	14
2.3.1 Transformação da precipitação em escoamento superficial .....	14
2.3.2 Simulação do Escoamento no Sistema de Drenagem.....	15
3 Metodologia .....	17
3.1 SWMM .....	17
3.1.1 Colocação de SUDS no SWMM .....	18
3.2 Caso de estudo .....	22
3.2.1 Análise Inicial.....	25

---

3.2.2	Identificação de Problemas.....	26
3.2.3	Cenários de estudo.....	28
4	Resultados e Discussão .....	37
4.1	Validação dos resultados .....	37
4.2	Análise dos Cenários de Estudo.....	37
4.3	Análise dos Volumes de Inundação das Câmaras de Visita .....	42
5	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	53
5.1	Conclusões .....	53
5.2	Limitações e Trabalhos Futuros.....	55
	Referências Bibliográficas.....	56

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Efeitos da urbanização no destino da precipitação (Adaptado de Butler & Davies (2011)) .....	4
Figura 2.2 - Hidrograma do escoamento superficial sob o efeito da urbanização (Adaptado de Butler & Davies (2011)) .....	5
Figura 2.3 - Alterações projetadas da precipitação anual (a) e da precipitação no verão (b) na Europa no período de 2071-2100 comparado com o período 1971-2000 (Adaptado de EEA (2017)) .....	6
Figura 2.4 - Alterações projetadas de precipitações intensas para o Inverno (a) e Verão (b) no período de 2071-2100 comparado com o período 1971-2000 (adaptado de EEA (2017)) .....	7
Figura 2.5 - Possível classificação dos vários termos sobre a drenagem urbana (Adaptado de Tim D. Fletcher et al. (2014)).....	9
Figura 2.6 - Quatro pilares dos SUDS (adaptado de Woods-Ballard et al. (2015)) .....	10
Figura 2.7 - Tipos de SUDS – (a) Depósito de armazenamento de águas pluviais (ERAhbt@, 2017); (b) Pavimento permeável (SUDSnet@, 2017b); (c) Trincheira de infiltração (SUDSWales@, 2017); (d) Vala com cobertura vegetal (SUDSnet@, 2017c); (e) Bacia de retenção (SUDSnet@, 2017a); (f) Sistema de tratamento (Storm-Water@, 2017).....	12
Figura 2.8 – Cadeia de gestão dos SUDS (Adaptado de Butler & Davies (2011)) .....	13
Figura 2.9 - Esquema da modelação de sistemas de drenagem de águas pluviais (Adaptado de Zoppou (2001)).....	14
Figura 2.10 - Soluções tradicionais no caso do sistema entrar em carga: (a) a água que chega a superfície perde-se; (b) a altura da água aumenta indefinidamente; (c) utilização de um reservatório virtual (Adaptado de Lima et al. (2013)).....	16
Figura 3.1 - Exemplo de uma rede de drenagem no SWMM.....	18
Figura 3.2 – (a) Antes da colocação do SUDS; (b) após a colocação do SUDS; (c) após o ajuste da % de impermeáveis.....	19
Figura 3.3 - Janela de definição da colocação de SUDS .....	20
Figura 3.4 - Representação de um depósito de armazenamento de água pluvial no SWMM (Adaptado do SWMM).....	20
Figura 3.5 - Representação de uma desconexão do telhado no SWMM (Adaptado do SWMM) .....	21
Figura 3.6 - Representação de um pavimento permeável no SWMM (Adaptado do SWMM).....	21
Figura 3.7 - Zona de estudo. Vale das Flores, Coimbra. (Fonte: Google Earth).....	22
Figura 3.8 - Rede de drenagem no SWMM.....	23
Figura 3.9 - Hietograma da chuvada de projeto utilizada com período de retorno de 20 anos .....	24
Figura 3.10 - Parâmetros do modelo de onda dinâmica .....	25



Figura 3.11 - Localização das câmaras de visita com maiores volumes de inundação e das respetivas áreas a montante .....	27
Figura 3.12 - Desconexão de telhado (Creeksmart@, 2017).....	28
Figura 3.13 - Depósito de armazenamento de águas pluviais ((ERAhbt@, 2017) .....	28
Figura 3.14 - Pavimento Permeável (SUDSnet@, 2017).....	29
Figura 3.15 - Divisão da área impermeável.....	29
Figura 3.16 - Bacia da rede de estudo (Fonte: Google Earth) .....	29
Figura 3.17 - Bacia 235 (circulo vermelho) .....	31
Figura 3.18 - Pré-dimensionamento dos barris de 1000 litros.....	32
Figura 3.19 - Pré-dimensionamentos dos barris de 500 litros .....	32
Figura 3.20 - Pré-dimensionamento dos barris de 300 litros.....	33
Figura 3.21 - Imagem de satélite da bacia 235 (Fonte: Google Earth).....	34
Figura 3.22 - Altura no nível da água na camada de armazenamento do pavimento permeável .....	35
Figura 4.1 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 0 (inicial).....	38
Figura 4.2 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 1 (Desconexões de Telhado).....	38
Figura 4.3 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 2 (Depósitos de Armazenamento de Águas Pluviais).....	39
Figura 4.4 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 3 (Pavimentos Permeáveis).....	40
Figura 4.5 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 4 (Desconexões de Telhado e Pavimentos Permeáveis).....	40
Figura 4.6 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 4 (Depósitos de Armazenamento de Águas Pluviais e Pavimentos Permeáveis).....	41
Figura 4.7 - Caudal afluente à câmara de visita 837 para os diferentes cenários.....	43
Figura 4.8 - Caudal de inundação da câmara de visita 837 para os diferentes cenários.....	44
Figura 4.9 - Caudal afluente da câmara de visita 511 para os diferentes cenários.....	45
Figura 4.10 - Caudal de inundação da câmara de visita 511 para os diferentes cenários.....	45
Figura 4.11 - Caudal afluente da câmara de visita 292 para os diferentes cenários.....	46
Figura 4.12 - Caudal de inundação da câmara de visita 292 para os diferentes cenários.....	47
Figura 4.13 - Caudal afluente da câmara de visita 710 para os diferentes cenários.....	48
Figura 4.14 - Caudal de inundação da câmara de visita 710 para os diferentes cenários.....	48
Figura 4.15 - Caudal afluente da câmara de visita 699 para os diferentes cenários.....	49
Figura 4.16 - Caudal de inundação da câmara de visita 699 para os diferentes cenários.....	50
Figura 4.17 - Caudal afluente da câmara de visita 609 para os diferentes cenários.....	51
Figura 4.18 - Caudal de inundação da câmara de visita 609 para os diferentes cenários.....	51

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Funções dos componentes dos vários sistemas dos SUDS (Adaptado de Woods-Ballard et al. (2015)).....	11
Quadro 3.1 – Análise inicial - bacias.....	25
Quadro 3.2 - Análise inicial - Conduitas .....	26
Quadro 3.3 - Volumes afluentes e de inundação das caixas de visita críticas.....	27
Quadro 3.4 - Dados relativos à constituição da desconexão de telhados .....	30
Quadro 3.5 - Dados relativos à implementação da desconexão de telhados .....	31
Quadro 3.6 - Resultados do dimensionamento do depósito de armazenamento de água pluvial para a bacia 235 .....	33
Quadro 3.7 - Dados relativos à constituição do depósito de armazenamento de águas pluviais .....	34
Quadro 3.8 - Dados relativos à implementação do depósito de armazenamento de águas pluviais .....	34
Quadro 3.9 - Dados relativos à constituição do pavimento permeável .....	36
Quadro 3.10 - Dados relativos à implementação do pavimento permeável .....	36
Quadro 4.1 - Erros de continuidade dos diferentes cenários .....	37
Quadro 4.2 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 0 (inicial).....	37
Quadro 4.3 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 1 (Desconexões de Telhado).....	38
Quadro 4.4 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 2 (Depósitos de Armazenamentos de Águas Pluviais) .....	39
Quadro 4.5 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 3 (Pavimentos Permeáveis) .....	39
Quadro 4.6 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 4 (Desconexões de Telhado e Pavimentos Permeáveis).....	40
Quadro 4.7 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 5 (Depósitos de Armazenamento de Águas Pluviais e Pavimentos Permeáveis).....	41
Quadro 4.8 - Volumes do escoamento superficial e inundação dos diferentes cenários.....	41
Quadro 4.9 - Percentagens de redução dos volumes de escoamento superficial e inundação dos diferentes cenários .....	42
Quadro 4.10 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 837 .....	43
Quadro 4.11 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 511 .....	44
Quadro 4.12 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 292 .....	46
Quadro 4.13 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 710 .....	47
Quadro 4.14 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 699 .....	49
Quadro 4.15 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 609 .....	50

Quadro 4.16 - Resultados da redução percentual do volume de inundação de cada câmara de visita relativamente a cada cenário ..... 52

## **ABREVIATURAS**

RGSPDADAR - Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais

EEA – European Environment Agency

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

SUDS – Sustainable Urban Drainage Systems

WSUD – Water Sensitive Urban Design

BMP – Best Management Practices

LID – Low Impact Development

SWMM – Storm Water Management Model

1D – Unidimensional

2D – Bidimensional

# 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional torna-se inevitável o aparecimento de maiores aglomerados urbanos e as áreas permeáveis onde ocorria a infiltração, agora dão lugar a áreas impermeáveis que impedem a água de se infiltrar no solo. Com isto, o nível de poluição nas águas que recebem o escoamento superficial aumenta devido ao transporte de sedimentos e poluentes e o risco de inundação nas cidades torna-se maior devido ao escoamento superficial volumoso e repentino (Butler & Davies, 2011).

O crescimento populacional também é sinónimo de maior atividade humana e com essa atividade aumentam as emissões de gases de efeito de estufa. As emissões de gases de efeito de estufa são as principais responsáveis pela forte aceleração do ritmo das alterações climáticas que se têm observado no último século. Os eventos climáticos extremos e imprevisíveis serão cada vez mais frequentes e terão efeitos nefastos para todo o mundo, nomeadamente os eventos de precipitação que serão cada vez mais intensos e frequentes (EEA, 2017), o que aliado a uma forte urbanização origina um grande risco de inundação.

Por isto é que uma adequada drenagem das águas pluviais nos meios urbanos é importante, mas o desafio é acompanhar o ritmo do crescimento urbano e das alterações climáticas. Até certo ponto a solução era aumentar a capacidade dos dispositivos de drenagem, mas não é possível nem sustentável aumentar indefinidamente as dimensões dos elementos de drenagem, pelo que é necessário procurar soluções alternativas.

Os Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS) surgem como alternativa ao método de drenagem por condutas (Butler & Davies, 2011) e são projetados para maximizar as oportunidades e benefícios que advêm do controlo do escoamento superficial (Woods-Ballard et al., 2015). As principais funções dos SUDS são controlar a quantidade e qualidade do escoamento superficial e criar e manter melhores lugares para as pessoas e para o ambiente (Woods-Ballard et al., 2015). É na perspetiva de um futuro sustentável que os SUDS são vistos como uma mais valia para a sociedade e para o ambiente.

## 1.1 Objetivos

Esta dissertação pretende avaliar o potencial de alguns SUDS de controlo na origem na redução do escoamento superficial para um caso de estudo usando o *software* SWMM. Os objetivos são:

- Rever e sintetizar a literatura sobre a drenagem urbana sustentável;

- Analisar uma bacia urbana e identificar os seus problemas de drenagem de águas pluviais;
- Avaliar a performance dos SUDS com foco no controlo na origem das águas pluviais na redução do escoamento e a sua eficiência na resolução dos problemas identificados.

## **1.2 Estrutura**

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos:

- Capítulo 1: introdução aos temas relevantes para este estudo, aos objetivos do mesmo e à estrutura da dissertação
- Capítulo 2: revisão da literatura sobre a drenagem urbana e as suas condicionantes, sobre a drenagem urbana sustentável com especial incidência sobre os SUDS e também sobre a modelação de sistemas de drenagem.
- Capítulo 3: descrição da metodologia utilizada, do caso de estudo, dos problemas identificados e dos cenários analisados.
- Capítulo 4: apresentação e análise dos resultados do estudo realizado.
- Capítulo 5: realização das conclusões da dissertação, apresentação das limitações encontradas ao longo do estudo e sugestão de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é feita uma revisão da literatura acerca dos temas fundamentais para a interpretação desta dissertação. Em primeiro lugar é feita uma descrição da drenagem urbana e dos impactos da urbanização e das alterações climáticas sobre esta. De seguida apresentam-se alguns conceitos sobre a drenagem urbana sustentável, com principal incidência sobre os SUDS. Posteriormente são enumerados os vários tipos de SUDS, assim como as suas funções e benefícios. Por fim é feita uma síntese do processo de modelação de sistemas de drenagem.

### 2.1 Drenagem Urbana

Os sistemas de drenagem são necessários em áreas urbanas devido à interação entre a atividade humana e o ciclo natural da água (Butler & Davies, 2011).

Segundo Butler & Davies (2011) a atividade humana influencia o ciclo hidrológico devido, principalmente, ao uso de água para consumo humano e à cobertura do solo com superfícies impermeáveis. O uso de água para consumo humano “desvia” a água do ciclo hidrológico tradicional e altera a sua composição devido a atividades domésticas ou industriais. Esta água é denominada de água residual doméstica ou água residual industrial, dependendo da sua utilização e deve ser drenada adequadamente. A cobertura do solo com superfícies impermeáveis afeta principalmente a drenagem das águas pluviais, já que onde antes ocorria uma drenagem de forma natural com a devida infiltração e evaporação, agora maior parte do volume precipitado converte-se em escoamento superficial, sendo este mais veloz, o que origina grandes caudais de ponta.

Existem dois tipos principais de sistemas de drenagem urbana: sistemas unitários em que ambos os tipos de água (residual e pluvial) são drenados pela mesma rede de coletores, e os sistemas separativos em que existem duas redes de coletores, uma para as águas residuais e outra para as águas pluviais. Inicialmente, a norma era o uso de sistemas unitários, mas atualmente a maioria dos sistemas que são construídos são do tipo separativo, pelo que é possível que uma cidade possua um sistema misto em que a rede de drenagem mais antiga é unitária e a mais recente será separativa. Contudo, segundo Lima et al. (2013) não existe consenso sobre qual dos sistemas será melhor mas parece ser consensual o princípio de “tirar o máximo partido do que já existe”, uma vez que construir um sistema totalmente novo tem maiores custos associados. De referir que, segundo a legislação portuguesa (Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais - RGSPDADAR) o sistema de drenagem a implementar numa rede nova deverá ser do tipo separativo.

### 2.1.1 Efeitos da Urbanização na drenagem de águas pluviais

Com o processo da urbanização e com o conseqüente aumento das superfícies impermeáveis nas cidades, são vários os impactos ao nível da drenagem de águas pluviais. Fletcher et al. (2013) e Butler & Davies (2011) referem que as superfícies impermeáveis originam um aumento no volume e na velocidade do escoamento superficial, assim como perdas nos volumes de infiltração e evapotranspiração (Figura 2.1).

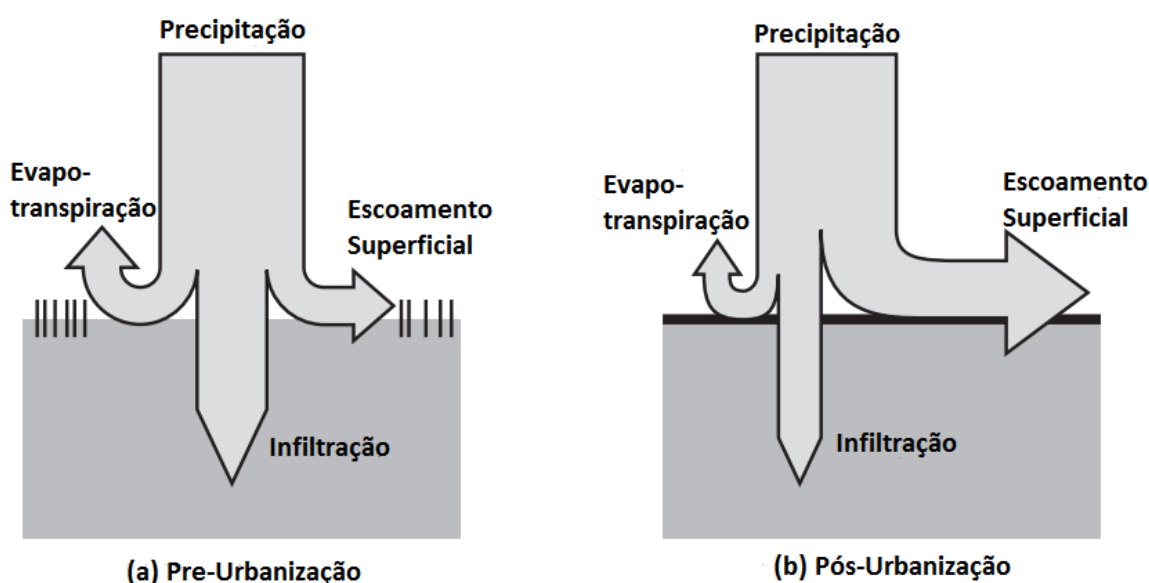


Figura 2.1 – Efeitos da urbanização no destino da precipitação (Adaptado de Butler & Davies (2011))

Tal como podemos observar na Figura 2.2, com a urbanização o volume do escoamento superficial será maior e o caudal de ponta irá atingir valores mais elevados e repentinos do que o escoamento superficial numa superfície natural. Estas alterações induzem um maior risco de ocorrência de cheias em áreas urbanas. Outro impacto da urbanização na drenagem de águas pluviais é a degradação da qualidade da água drenada. O aumento da velocidade e volume do escoamento superficial faz com que os sedimentos e poluentes que se encontram no meio urbano sejam levados pela corrente e poluam as águas recetoras (Butler & Davies, 2011).



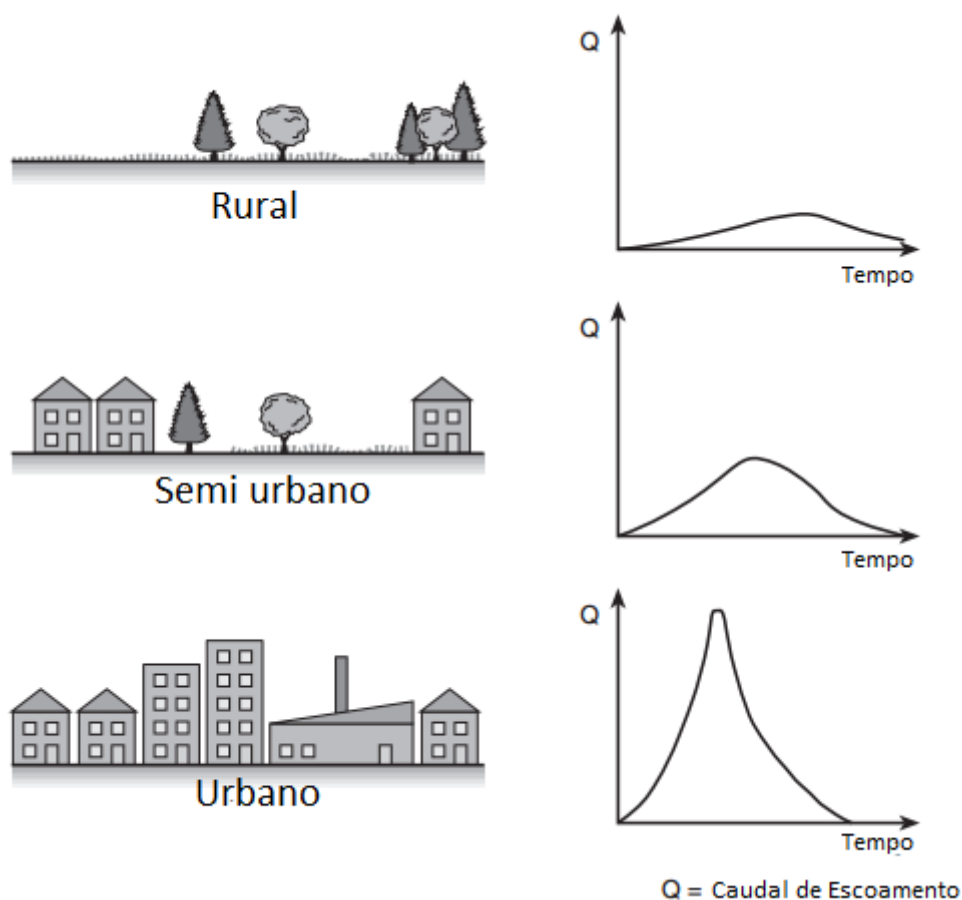


Figura 2.2 - Hidrograma do escoamento superficial sob o efeito da urbanização (Adaptado de Butler & Davies (2011))

### 2.1.2 Efeitos das alterações climáticas na drenagem de águas pluviais

As alterações climáticas podem ter causas naturais como, por exemplo, a atividade vulcânica, na qual a influência humana é nula, ou causas antropogénicas, onde as emissões de gases de efeito de estufa têm maior contributo. Segundo o relatório da Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2017), a atual concentração média anual de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é aproximadamente 400 partes por milhão, sendo este o valor mais elevado dos últimos 800000 anos. Além disso, a EEA (2017) afirma que mesmo que hoje houvesse uma redução total dos níveis de  $\text{CO}_2$ , as consequências iriam manifestar-se durante dezenas ou até mesmo centenas de anos.

Para este trabalho interessam as alterações climáticas a nível da precipitação por ser esse o principal fator a ter em conta quando se aborda a drenagem de águas pluviais.

Segundo o relatório da EEA (2017), desde 1960, foi observado um aumento da precipitação anual no norte da Europa e um decréscimo no Sul. Para o período de 2071-2100, prevê-se que estas alterações continuem neste sentido (Figura 2.3 (a)) com o pormenor de que o decréscimo da precipitação anual no sul da Europa será mais intenso no verão (Figura 2.3 (b)).

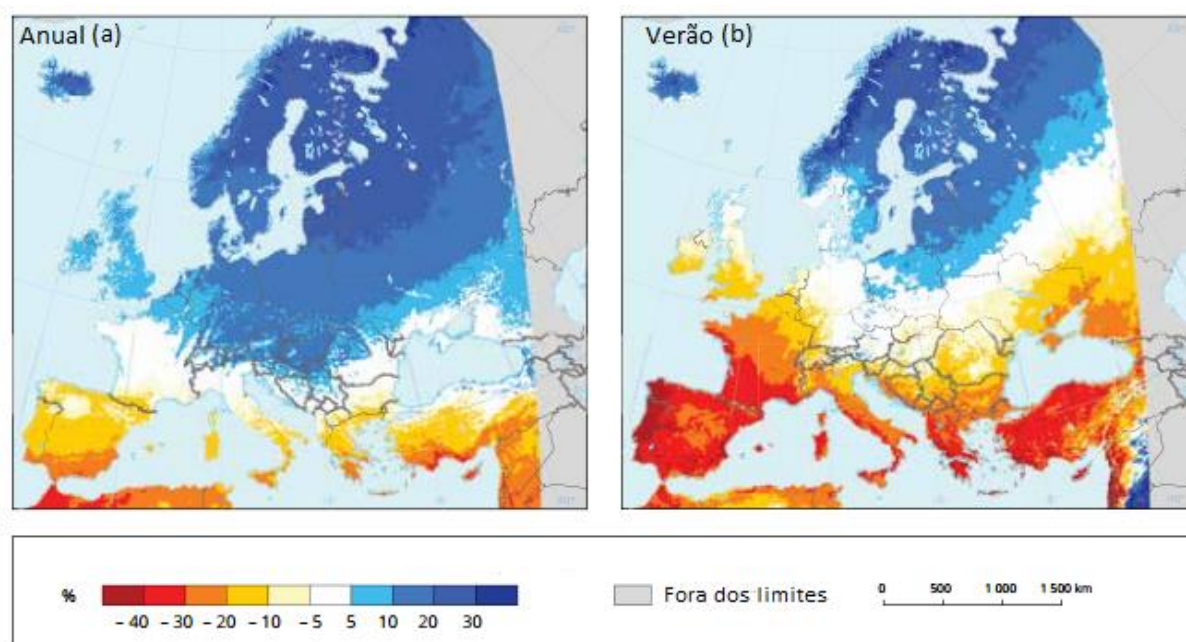


Figura 2.3 - Alterações projetadas da precipitação anual (a) e da precipitação no verão (b) na Europa no período de 2071-2100 comparado com o período 1971-2000 (Adaptado de EEA (2017))

Para além da precipitação anual interessa-nos também saber quais as alterações a nível dos fenómenos de precipitação intensa já que, quando combinados com uma densidade populacional elevada e uma alta percentagem de áreas impermeáveis, resultam num enorme risco de inundações.

A EEA (2017) refere que na Europa existe um consenso geral na comunidade científica de que, em média, as chuvas estão cada vez mais intensas e frequentes. No entanto, existem diferenças importantes entre regiões e alturas do ano. Segundo as previsões utilizadas pela Agência Europeia do Ambiente os fenómenos de precipitação intensa irão aumentar, principalmente no período de Inverno (Figura 2.4 (a)). No verão também haverá um aumento, mas, no sul da Europa, verifica-se um decréscimo na ocorrência de fenómenos de precipitação intensa (Figura 2.4 (b)).

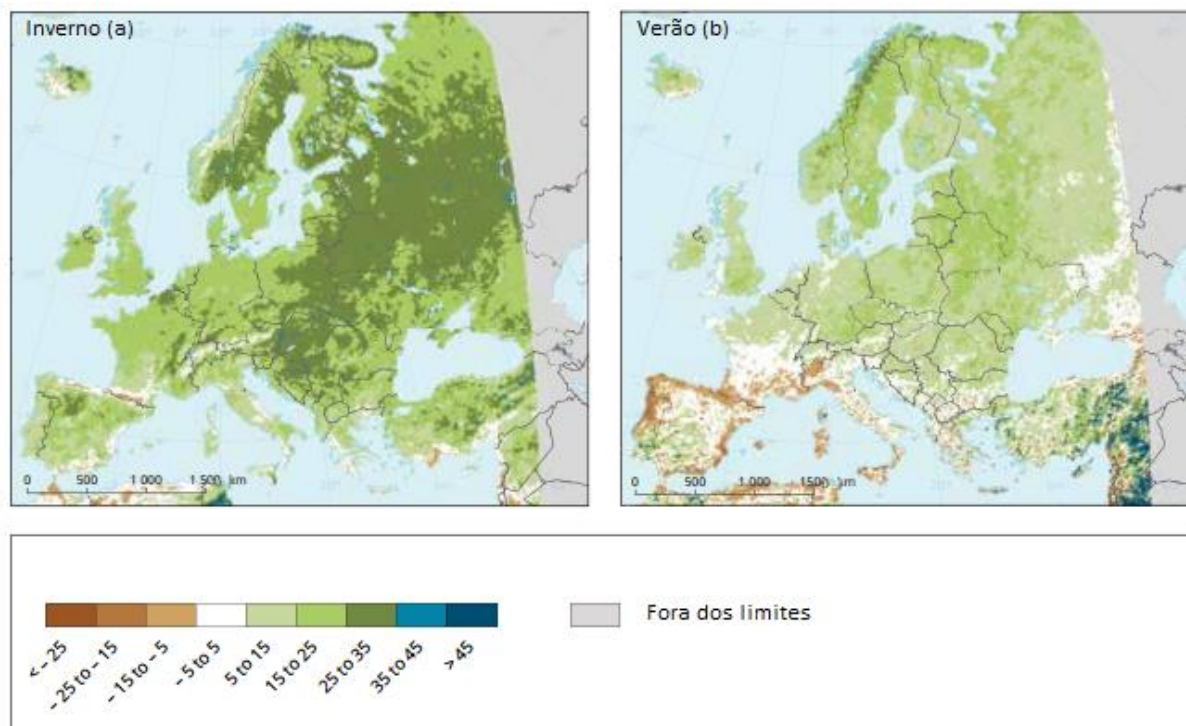


Figura 2.4 - Alterações projetadas de precipitações intensas para o Inverno (a) e Verão (b) no período de 2071-2100 comparado com o período 1971-2000 (adaptado de EEA (2017))

No que diz respeito à precipitação, conclui-se que, no geral, haverá um aumento no volume, intensidade e frequência da precipitação embora nas regiões mais a sul poderá haver um decréscimo (EEA, 2017; IPCC, 2014)

### 2.1.3 Drenagem Urbana Sustentável

Um dos maiores desafios da drenagem urbana de águas pluviais é acompanhar o ritmo do crescimento urbano e das alterações climáticas. Até certo ponto a solução era aumentar a capacidade dos dispositivos de drenagem, mas não é possível nem sustentável aumentar indefinidamente as dimensões dos elementos de drenagem, pelo que foi necessário procurar soluções alternativas.

Como há cidades em todo o mundo e a chuva é um fenómeno global, surgiram em várias partes do planeta abordagens similares a este desafio. Termos como *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) do Reino Unido, *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) da Austrália, *Low Impact Development* (LID) e *Best Management Practices* (BMP) da América do Norte, encaram de maneira diferente, mas parecida, o tema da drenagem urbana sustentável. De acordo com Fletcher et al. (2013), partilham os seguintes objetivos:

- Gerir o ciclo hidrológico urbano de uma maneira sustentável;
- Manter o regime de escoamento o mais próximo possível do estado natural;
- Proteger e, se possível, restaurar a qualidade da água tanto a nível superficial como a subterrâneo;
- Proteger e se possível restaurar a qualidade das águas recetoras;
- Conservar os recursos hídricos considerando as águas pluviais como um recurso e não como um mal indesejado;
- Melhorar a paisagem urbana e a amenidade incorporando as tecnologias de drenagem urbana com a paisagem.

São vários os termos associados à drenagem urbana sustentável que podem indicar técnicas específicas ou representar princípios mais abrangentes. Ao longo do tempo, estes vão sofrendo transformações e, um termo que antes era associado a uma perspectiva não estrutural, passa a exprimir medidas estruturais ou um termo que antes tinha como foco apenas uma das componentes do ciclo hidrológico urbano passar a considerar todo o ciclo. Por exemplo, segundo Wong (2007), o WSUD nos seus tempos iniciais tinha como foco apenas as águas pluviais, mas depois percebeu-se que havia a necessidade de considerar todo o ciclo hidrológico urbano, incluindo o abastecimento e as drenagens residuais e pluviais.

Como podemos observar na Figura 2.5, os termos WSUD e LID representam conceitos e princípios gerais sobre todo o ciclo hidrológico urbano enquanto que os SUDS ou as BMP exprimem técnicas específicas e com foco nas águas pluviais. Tim D. Fletcher et al. (2014) refere que esta classificação pode mudar com o tempo, mas que, no geral, todos os termos seguem dois princípios gerais:

- Mitigação das mudanças na hidrologia e evolução do regime de escoamento para o estado mais natural possível;
- Melhoria da qualidade da água e redução de poluentes.

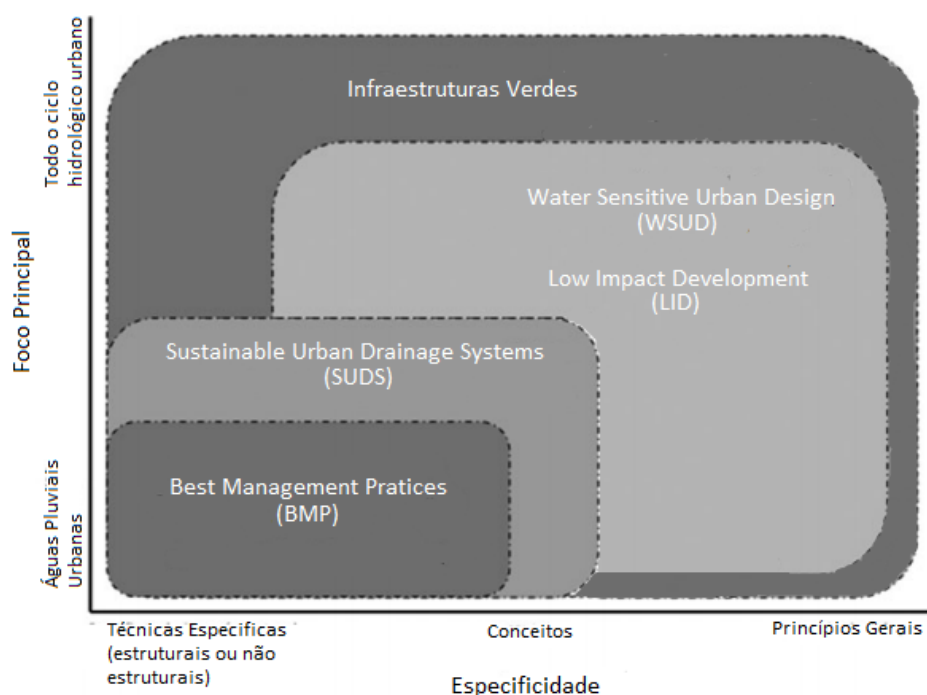


Figura 2.5 - Possível classificação dos vários termos sobre a drenagem urbana (Adaptado de Tim D. Fletcher et al. (2014))

Deste ponto em diante esta dissertação usará a terminologia de Sistemas Urbanos de Drenagem Sustentável (SUDS).

## 2.2 SUDS

O termo SUDS (*Sustainable urban drainage systems*) teve origem no Reino Unido e consiste num grupo de técnicas e tecnologias usadas na drenagem de águas pluviais, que surgem como alternativa aos métodos convencionais de drenagem por condutas e que têm como objetivo a formação de uma rede de drenagem pluvial o mais natural e eficiente possível (Ashley et al., 2015). Os SUDS são configurados como uma sequência de práticas e tecnologias que interagem umas com as outras de maneira a formar uma rede de drenagem sustentável (Tim D. Fletcher et al., 2014), pretendendo maximizar as oportunidades e benefícios provenientes da gestão do escoamento superficial (Woods-Ballard et al., 2015).

Segundo Woods-Ballard et al. (2015), os SUDS assentam em quatro pilares principais (Figura 2.6):

- Controlo da quantidade de escoamento superficial de maneira a gerir o risco de cheia e para manter e proteger o ciclo natural da água;
- Prevenção da poluição gerada pelo escoamento superficial;

- Promoção da amenidade nas cidades;
- Proteção da biodiversidade.



Figura 2.6 - Quatro pilares dos SUDS (adaptado de Woods-Ballard et al. (2015))

### 2.2.1 Benefícios dos SUDS

Os benefícios dos SUDS abrangem várias áreas e consistem em reduzir o risco de cheias em áreas urbanas, assim como os impactos da urbanização no ciclo hidrológico nomeadamente a diminuição da água infiltrada e como consequência do escoamento base. Pretendem ainda evitar e minimizar a poluição causada pelo escoamento superficial, providenciando reservas de água e protegendo a biodiversidade. Os SUDS também proporcionam às áreas urbanas um aumento da qualidade de vida tornando-as mais conscientes, visualmente apelativas, sustentáveis e mais resilientes à mudança (Butler & Davies, 2011; Woods-Ballard et al., 2015).

De maneira a maximizar os seus benefícios, os SUDS devem seguir algumas máximas enumeradas por (Woods-Ballard et al., 2015):

- Usar o escoamento superficial como um recurso;
- Gerir as águas pluviais junto à fonte;

- Controlar o escoamento superficial;
- Permitir que a água pluvial se infiltre no solo;
- Promover a evapotranspiração;
- Atrasar e armazenar o escoamento superficial tentando alcançar as características de um escoamento natural;
- Reduzir a contaminação gerada pelo escoamento superficial através da prevenção de poluição e controlando-o junto à fonte;
- Tratar as águas escoadas para reduzir a poluição ambiental causada por contaminantes urbanos.

### 2.2.2 Tipos de SUDS

Segundo Woods-Ballard et al. (2015) os SUDS podem ser divididos em seis tipos de sistemas. Estes estão enumerados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Funções dos componentes dos vários sistemas dos SUDS (Adaptado de Woods-Ballard et al. (2015))

<b>Tipo de sistemas</b>	<b>Função</b>
<b>Sistemas de captação</b>	Componentes que capturam a água da chuva e facilitam o seu uso (Figura 2.7 (a))
<b>Sistemas de superfícies permeáveis</b>	Superfícies que permitem a penetração da água. Estes sistemas podem incluir armazenamento e tratamento. (Figura 2.7 (b))
<b>Sistemas de infiltração</b>	Componentes que facilitam a infiltração da água no solo. É frequente possuírem capacidade de armazenamento de maneira a controlar a quantidade de água que é libertada para o solo (Figura 2.7 (c))
<b>Sistemas de condução</b>	Componentes que conduzem o escoamento na direção dos sistemas de armazenamento. Quando possível devem controlar o fluxo do escoamento e providenciar tratamento (Figura 2.7 (d))
<b>Sistemas de armazenamento</b>	Componentes que com capacidade de armazenamento e que controlam o fluxo e volume do escoamento atenuando a sua libertação. Podem também fornecer tratamento (Figura 2.7 (e))
<b>Sistemas de tratamento</b>	Componentes que removem ou facilitam a degradação dos contaminantes presentes no escoamento (Figura 2.7 (f))

Estas funções não são independentes, e um SUDS pode providenciar duas ou mais funções (Woods-Ballard et al., 2015). Por exemplo, muitos SUDS, como os telhados verdes, trincheiras de infiltração, valas com cobertura vegetal e bacias de retenção não só satisfazem o controlo da quantidade e qualidade de água como reforçam a biodiversidade e são aceites esteticamente pelo público (Scholz, 2015).



Figura 2.7 - Tipos de SUDS – (a) Depósito de armazenamento de águas pluviais (ERAhbt@, 2017); (b) Pavimento permeável (SUDSnet@, 2017b); (c) Trincheira de infiltração (SUDSWales@, 2017); (d) Vala com cobertura vegetal (SUDSnet@, 2017c); (e) Bacia de retenção (SUDSnet@, 2017a); (f) Sistema de tratamento (Storm-Water@, 2017)



### 2.2.3 Cadeia de Gestão dos SUDS

Os SUDS não devem ser vistos como um componente individual, mas sim como um conjunto de equipamentos que se complementam entre si desde o momento em que a chuva alcança o solo até essa mesma água ser descarregada para o ambiente (Butler & Davies, 2011; Tim D. Fletcher et al., 2014; Woods-Ballard et al., 2015). A combinação dos vários tipos de sistemas de drenagem sustentável formam uma rede de drenagem sustentável designada por cadeia de gestão dos SUDS, adaptado do inglês “*SUDS Management Train.*” (Woods-Ballard et al., 2015).

O escoamento deve ser controlado, sempre que possível, junto à fonte para depois ser conduzido para sistemas de armazenamento ou tratamento. A passagem da água entre componentes deve ser feita com o uso de sistemas de condução acima do solo (como por exemplo as valas com cobertura vegetal) embora, em situações específicas, o uso de sistemas de condução abaixo do solo ou até mesmo de condutas pode ser mais eficiente (Woods-Ballard et al., 2015). A Figura 2.8 ilustra uma sequência de possibilidades recomendada por Butler & Davies (2011) da cadeia de gestão dos SUDS. A solução ótima será encontrar uma solução de drenagem o mais próximo possível da fonte mas no caso de não serem satisfeitas todas as necessidades de drenagem nesse ponto deverá ser encontrada uma solução complementar ao longo da sequência (Butler & Davies, 2011).

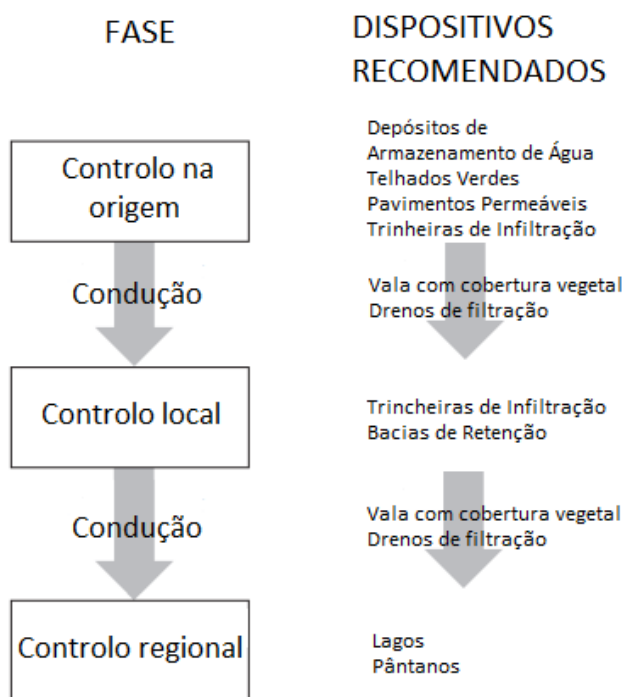


Figura 2.8 – Cadeia de gestão dos SUDS (Adaptado de Butler & Davies (2011))

## 2.3 Modelação de Sistemas de Drenagem de Águas Pluviais

A modelação de sistemas de drenagem de águas pluviais pode ser dividida em dois componentes principais: O componente de transformação da precipitação em escoamento superficial e o componente hidráulico. No primeiro componente são calculadas as perdas da precipitação e elaborado um hidrograma do escoamento superficial. O componente hidráulico tem como dados de entrada o hidrograma do escoamento superficial e modela o escoamento no sistema de drenagem (Leitão et al., 2008). Um esquema sintetizado do processo de modelação de sistemas de drenagem de águas pluviais é apresentado na Figura 2.9.

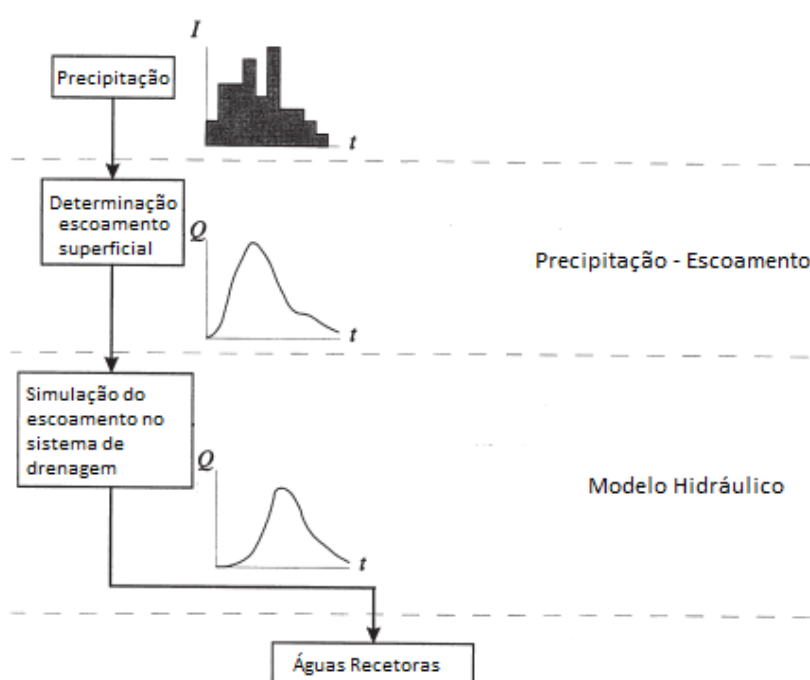


Figura 2.9 - Esquema da modelação de sistemas de drenagem de águas pluviais (Adaptado de Zoppou (2001))

A modelação de um sistema de drenagem de águas pluviais começa pela precipitação, principalmente pela chuva, visto que outras formas de precipitação também podem contribuir para as águas pluviais. Assim, os métodos de previsão e representação da chuva são cruciais para a construção, análise e operação dos sistemas de drenagem de águas pluviais (Butler & Davies, 2011).

### 2.3.1 Transformação da precipitação em escoamento superficial

O objetivo dos vários modelos hidrológicos é quantificar o escoamento superficial através de algoritmos de transformação da precipitação em escoamento em função das características da bacia drenante (Lima et al., 2013). A transformação da precipitação em escoamento pode ser

dividida em duas partes principais (Butler & Davies, 2011). A primeira é calcular as perdas devido à interceção da chuva pela vegetação, às depressões do solo, à infiltração e à evapotranspiração. A segunda é transformar a restante chuva, denominada de precipitação útil, em escoamento superficial.

Alguns dos principais modelos de transformação da precipitação em escoamento são: Método Racional, Método Curva-Tempo, Hidrograma Unitário e Modelos de Reservatório.

### **2.3.2 Simulação do Escoamento no Sistema de Drenagem**

É o escoamento superficial determinado pelos modelos hidrológicos que irá entrar na rede de condutas ou canais e é através dos modelos hidrodinâmicos que é simulado o escoamento no sistema de drenagem.

Numa abordagem mais tradicional, se o escoamento ocorrer em superfície livre e em regime permanente e uniforme, este pode ser calculado recorrendo à lei da resistência de Manning-Strikler. Mas para se obter uma representação mais completa da realidade é necessário recorrer aos modelos hidrodinâmicos (Lima et al., 2013).

Segundo Lima et al. (2013), as equações matemáticas unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D) mais utilizadas para descrever o comportamento de um escoamento variável em superfície livre são as equações de Saint-Venant, que resultam das equações de Navier-Stokes. As Equações de Saint-Venant, também conhecidas como equações de águas pouco profundas, representam a conservação da massa e da quantidade de movimento (Leitão et al., 2008) e permitem conhecer a altura de escoamento e a velocidade média do escoamento (Lima et al., 2013). Estas equações podem ser simplificadas, dependendo do rigor pretendido. (Butler & Davies, 2011; Lima et al., 2013).

Um caso particular será em situações de precipitação elevada em que o sistema pode entrar em carga e a água que escoava nos coletores atinge a superfície. Neste caso, a abordagem mais comum dos modelos comerciais disponíveis é não considerar interação entre o escoamento nos coletores e na superfície, o que afasta o modelo da realidade (Lima et al., 2013). As soluções adotadas pelos modelos são considerar perdida a água que atinge a superfície (Figura 2.10 (a)), aumentar ilimitadamente a altura da água (Figura 2.10 (b)) ou usar um reservatório virtual que armazena temporariamente a água inundada (Figura 2.10 (c)).

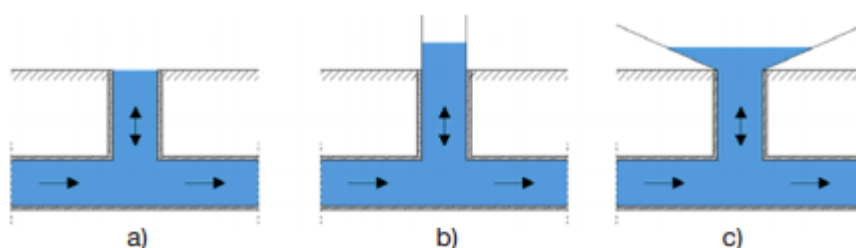


Figura 2.10 - Soluções tradicionais no caso do sistema entrar em carga: (a) a água que chega a superfície perde-se; (b) a altura da água aumenta indefinidamente; (c) utilização de um reservatório virtual (Adaptado de Lima et al. (2013))

No entanto, a necessidade de aproximar os modelos à realidade levou ao desenvolvimento do conceito de drenagem dual. Este conceito considera que o escoamento do sistema de drenagem pluvial pode se dar em condutas e à superfície e que existe interação entre os dois tipos de escoamento. Atualmente existem duas abordagens distintas aos modelos de drenagem dual: 1D/1D e 1D/2D. Na primeira abordagem tanto o escoamento nas condutas como na superfície é feito de modo unidimensional, na segunda abordagem o escoamento nas condutas também é feito de modo unidimensional mas na superfície considera-se um modelo bidimensional, no entanto estes modelos necessitam de muita informação e são muito exigentes do ponto de vista computacional (Lima et al., 2013)

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a modelação computacional de uma rede de drenagem de águas pluviais, feita por intermédio de um *software*. Também é apresentado o caso de estudo, são identificados os problemas da rede de drenagem estudada e definidas as soluções a analisar.

Este estudo foca-se na implementação de pavimentos permeáveis, depósitos de armazenamento de água pluvial e desconexões de telhado, que são técnicas de controlo na origem e que se encontram no topo da cadeia dos SUDS como foi demonstrado na secção 2.2.3 desta dissertação.

#### 3.1 SWMM

O *software* utilizado foi o *Storm Water Management Model* (SWMM), que foi desenvolvido pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, EPA. O SWMM é um modelo de simulação dinâmica hidrológica e hidráulica que simula a quantidade e a qualidade da água escoada num determinado instante ou ao longo do tempo (Rossman, 2015).

No SWMM uma rede de drenagem é constituída, essencialmente, por bacias, condutas e câmaras de visita. São várias as características que podemos definir para as bacias, como exemplo a sua área, declive e percentagem de áreas impermeáveis. É nas bacias que a precipitação se infiltra e/ou se transforma em escoamento superficial sendo que o SWMM permite-nos escolher o modelo de escoamento e de infiltração mais adequado para cada caso de estudo. Cada bacia está associada a uma câmara de visita, que é a responsável pela captação do escoamento superficial na rede de drenagem. As câmaras de visita possuem várias características, sendo a mais importante a sua profundidade máxima. Por fim temos as condutas que fazem a ligação entre câmaras de visita e encaminham a água até ao ponto de descarga da rede. Para as condutas podemos definir o seu comprimento e forma, assim como o seu declive. Um exemplo simples de uma rede de drenagem contruída no SWMM está exemplificado na Figura 3.1.

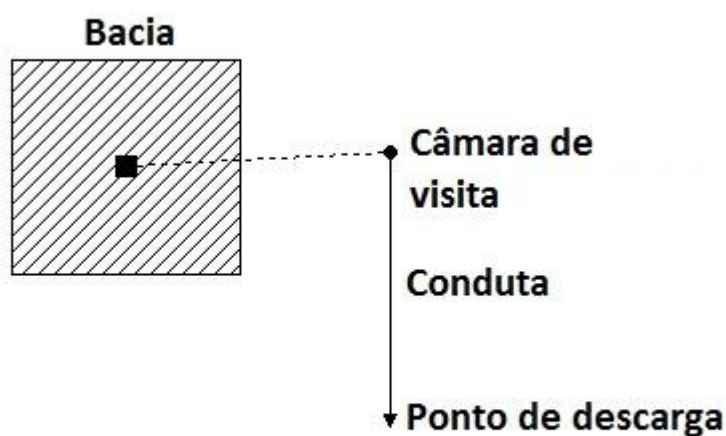


Figura 3.1 - Exemplo de uma rede de drenagem no SWMM

Para este estudo foi utilizada a versão 5.1.012 do SWMM, uma vez que esta versão permite modelar o desempenho hidráulico de vários tipos de SUDS.

### 3.1.1 Colocação de SUDS no SWMM

Atendendo ao que Rossman (2015) especifica no *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*, são estes os SUDS possíveis de simular no SWMM:

- Sistemas de bio retenção
- Jardins de chuva
- Telhados verdes
- Trincheiras de infiltração
- Pavimentos permeáveis
- Depósitos de armazenamento de águas pluviais
- Desconexões de telhado
- Valas com cobertura vegetal

Segundo Rossman (2015), existem duas maneiras de colocar sistemas urbanos de drenagem sustentável (SUDS) no SWMM:

- Colocar um ou mais SUDS numa bacia existente
- Criar uma nova bacia que é totalmente ocupada por apenas um SUDS

A primeira abordagem permite a colocação de vários tipos de SUDS numa bacia, embora cada técnica trate uma parcela do escoamento, isto é, não é possível colocar vários SUDS em série. Neste caso é necessário fazer ajustes à percentagem de área impermeável da bacia, uma vez que o SWMM não permite a colocação dos SUDS apenas na zona impermeável da bacia como podemos ver no exemplo da Figura 3.2.

Na segunda abordagem é criada uma nova bacia só para a colocação do SUDS. Então, neste caso, já é possível fazer com que o escoamento proveniente de um SUDS se dirija para outro, concretizando um tratamento em cadeia. Apesar de ser criada uma nova bacia para a implementação do SUDS, esta bacia poderá fazer parte de uma bacia já existente pelo que, neste caso, terá de ser feito um ajuste na percentagem de área impermeável (Figura 3.2) e também na sua área.

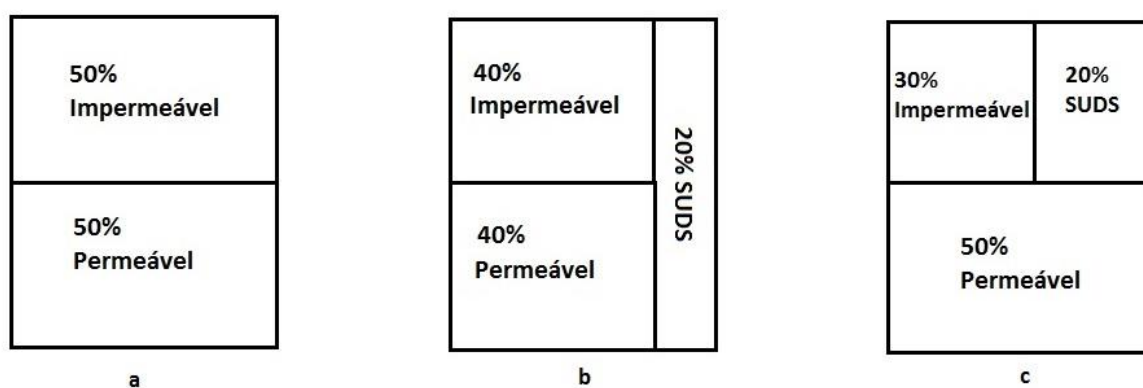


Figura 3.2 – (a) Antes da colocação do SUDS; (b) após a colocação do SUDS; (c) após o ajuste da % de impermeáveis.

No momento da colocação de um SUDS, o SWMM permite-nos definir várias características da implementação, como por exemplo o número de unidades e a área de cada unidade ou a percentagem de área impermeável da bacia que drena para o SUDS (Figura 3.3)

LID Occupies Full Subcatchment

Area of Each Unit (sq ft or sq m)

Number of Units

% of Subcatchment Occupied

Surface Width per Unit (ft or m)

% Initially Saturated

% of Impervious Area Treated

Send Drain Flow To:  
(Leave blank to use outlet of current subcatchment)

Return all Outflow to Pervious Area

Figura 3.3 - Janela de definição da colocação de SUDS

Relativamente aos SUDS que serão modelados, as figuras seguintes demonstram como o SWMM assume o modelo de um depósito de armazenamento de água pluvial (Figura 3.4), uma desconexão de telhado (Figura 3.5) e um pavimento permeável (Figura 3.6).

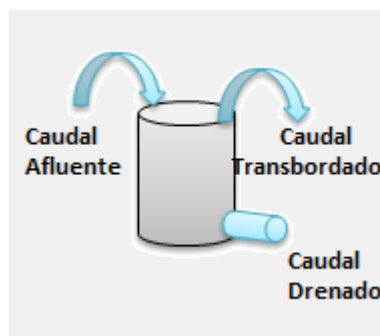


Figura 3.4 - Representação de um depósito de armazenamento de água pluvial no SWMM (Adaptado do SWMM)

Para os depósitos de armazenamento de água pluvial é permitido definir a sua altura e caudal de drenagem. Outras definições como a área, o número de depósitos ou a percentagem de área que drena para o depósito é definido no momento da colocação do SUDS na bacia (Figura 3.3).





Figura 3.5 - Representação de uma desconexão do telhado no SWMM (Adaptado do SWMM)

Para as desconexões de telhado, o SWMM permite definir as características da superfície do telhado, como por exemplo a sua rugosidade e declive, e também o caudal máximo suportado pelo dreno antes de transbordar. Parâmetros como o número de desconexões ou a área de telhado associado à desconexão são definidos no momento da colocação do SUDS na bacia pretendida (Figura 3.3)

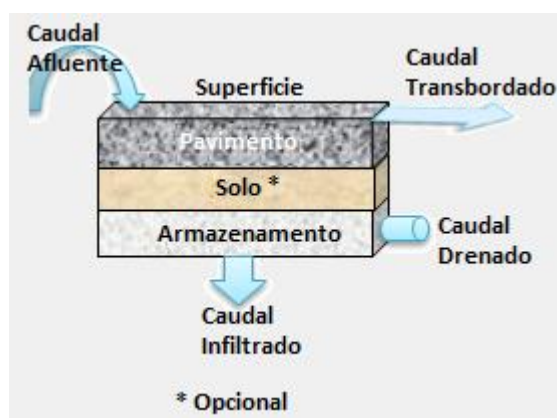


Figura 3.6 - Representação de um pavimento permeável no SWMM (Adaptado do SWMM)

Para o pavimento permeável é possível caracterizar as várias camadas que constituem este tipo de SUDS, assim como os caudais de infiltração e de drenagem. A área do pavimento é definida no momento da colocação do SUDS na bacia (Figura 3.3).

As definições relativas a cada tipo de SUDS, assim como o processo para as definir, são especificados na secção 3.2.3 desta dissertação.

### 3.2 Caso de estudo

O caso escolhido para ser o alvo deste estudo foi a rede de drenagem pluvial da zona do Vale das Flores em Coimbra (Figura 3.7).

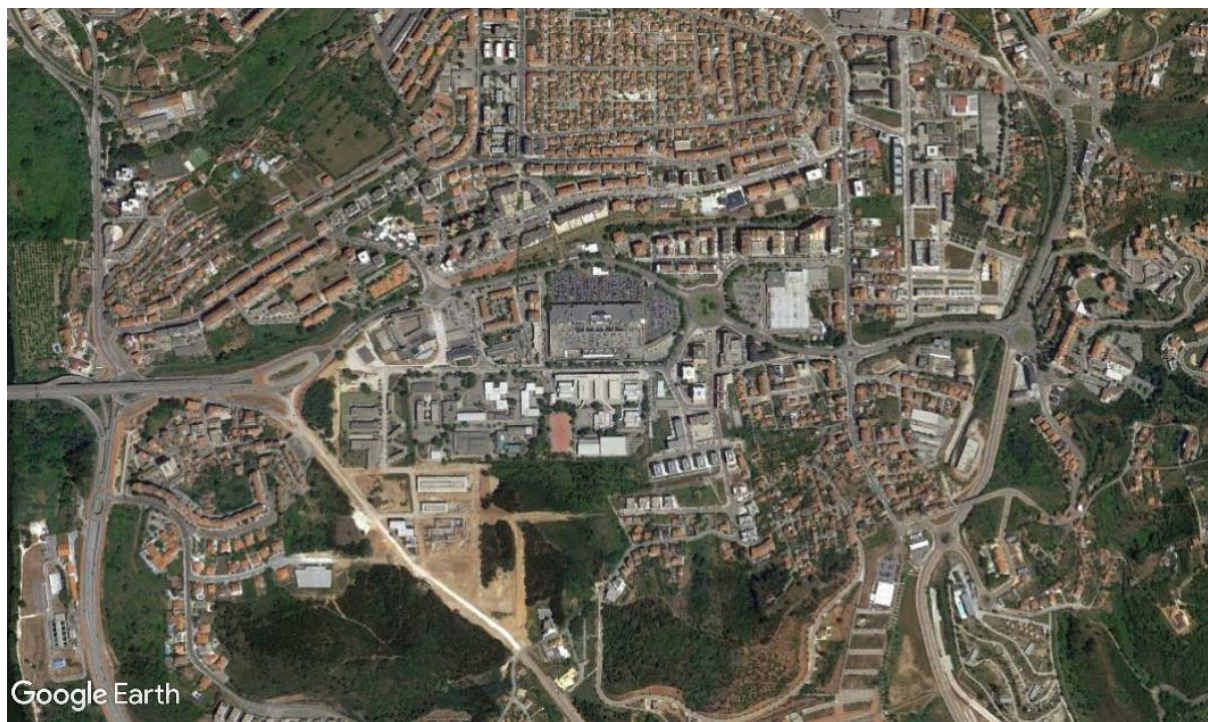


Figura 3.7 - Zona de estudo. Vale das Flores, Coimbra. (Fonte: Google Earth)

A rede de drenagem utilizada foi fornecida pelas Águas de Coimbra e não se encontra calibrada, pelo que foram utilizados os parâmetros da literatura.

A área de estudo é composta por uma bacia hidrográfica de aproximadamente 218 hectares dividida por 904 sub-bacias. As sub-bacias têm diferentes tamanhos, variando entre os 8,66 hectares e os 0,002 hectares de área. Quanto à percentagem de impermeáveis, esta também varia entre os valores 20% para a menos impermeável e 75% para a menos permeável. A média ponderada da percentagem de áreas impermeáveis de toda a área de estudo é de 51,4 %. O tempo de concentração da bacia é de aproximadamente 40 minutos.

O total de câmaras de visita e de condutas da rede é de 907 e, tal como as sub-bacias, também possuem diferentes características. As câmaras de visita diferem na profundidade, variando entre 0,59 e 7,89 metros. As condutas têm diferenças no seu comprimento, que pode variar entre 203,8 e 0,5 metros e na sua forma que pode ser circular, retangular fechada e retangular aberta.

Na Figura 3.8 está representada a rede de drenagem no SWMM com todas as bacias, câmaras de visita e condutas.

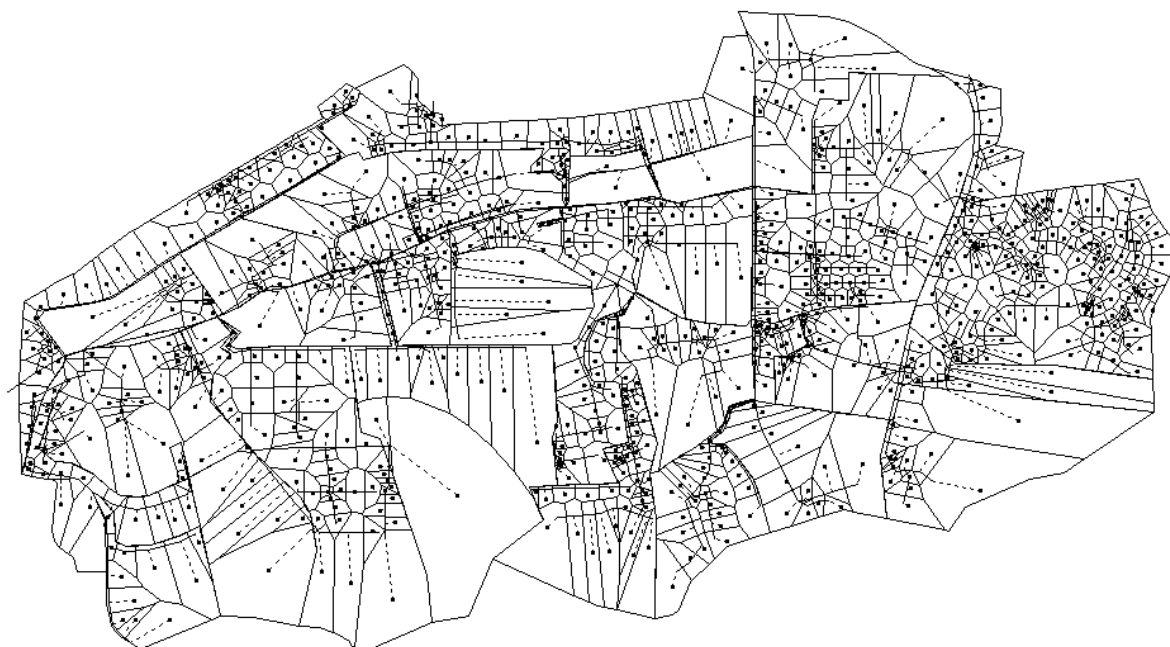


Figura 3.8 - Rede de drenagem no SWMM

A chuva utilizada neste estudo foi obtida através do método dos blocos alternados e tem um período de retorno de 20 anos e a duração de uma hora. O método dos blocos alternados é uma maneira simples de elaborar um hietograma de precipitação a partir de uma curva de intensidade-duração-frequência (IDF) (Chow et al., 1988). A curva IDF utilizada foi a curva correspondente à região de Coimbra para o período de retorno de 20 anos de acordo com a legislação portuguesa (RGSPDADAR). O hietograma da chuva de projeto está representado na Figura 3.9.

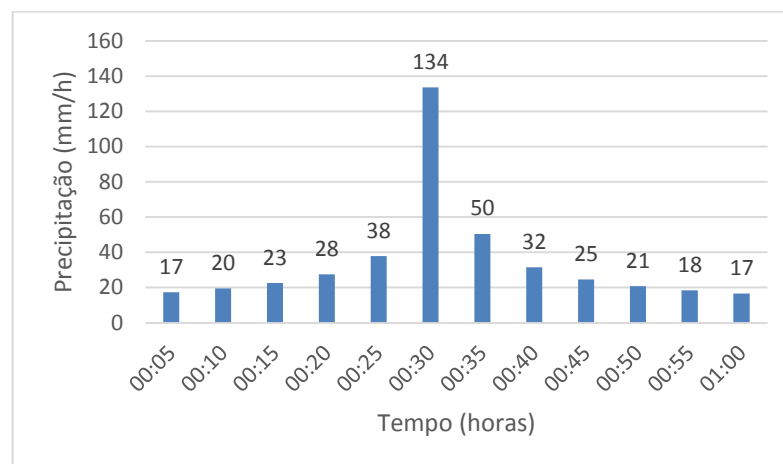


Figura 3.9 - Hietograma da chuva de projeto utilizada com período de retorno de 20 anos

Para o modelo de simulação do escoamento, o SWMM oferece-nos 3 opções que variam no grau de complexidade em que resolvem as equações de Saint-Venant. As Equações de Saint-Venant representam a conservação da massa e da quantidade de movimento e de acordo com Lima et al. (2013) são “as equações matemáticas unidimensionais e bidimensionais mais utilizadas para descrever o comportamento de um escoamento variável em superfície livre”. Para efeito deste estudo, o modelo escolhido foi o modelo de onda dinâmica, que segundo Rossman (2015) é o modelo que, teoricamente, produz resultados mais precisos. Os parâmetros relativos ao modelo de onda dinâmica estão representados na Figura 3.10.

Para representar a infiltração, o modelo utilizado foi o de Horton visto ser o mais comum e simples, de acordo com Butler & Davies (2011). Os parâmetros utilizados foram os correspondentes a solos de textura média (Butler & Davies, 2011): 200 mm/h para a caudal de infiltração máximo, 12 mm/h para o caudal de infiltração mínimo e  $2 \text{ h}^{-1}$  para a constante empírica de decaimento da infiltração.

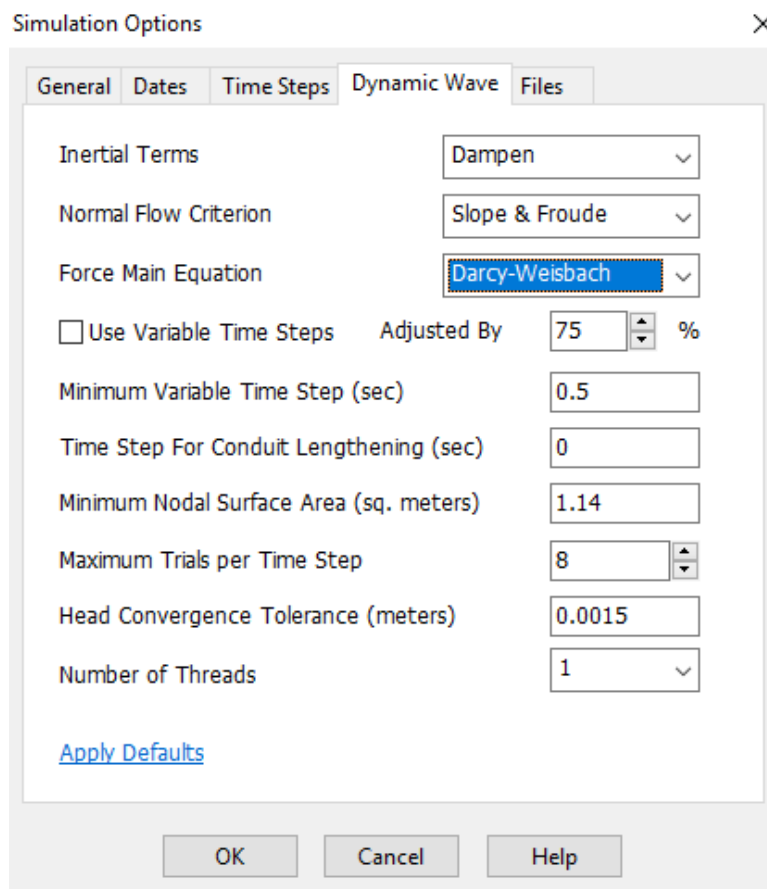


Figura 3.10 - Parâmetros do modelo de onda dinâmica

### 3.2.1 Análise Inicial

Após a definição da rede e dos modelos de simulação do escoamento e de infiltração foi feita uma análise inicial ao comportamento da rede de drenagem. Foram analisados os valores respetivos às bacias (Quadro 3.1) e às condutas (Quadro 3.2) para a chuvada de projeto com período de retorno de 20 anos.

Quadro 3.1 – Analise inicial - bacias

	<b>Bacias</b>	
<b>Precipitação</b>	35,11 mm	100 %
<b>Infiltração</b>	17,07 mm	48,62 %
<b>Escoamento superficial</b>	16,61 mm	47,3 %
<b>Armazenamento</b>	1,46 mm	4,16 %
<b>Erro de Continuidade</b>	-0,03 mm	-0,08 %

Quadro 3.2 - Análise inicial - Conduatas

	<b>Conduatas</b>	
<b>Volume Total</b>	36189 m <sup>3</sup>	100 %
<b>Volume de Inundação</b>	6637 m <sup>3</sup>	18,34 %
<b>Volume de Saída</b>	29499 m <sup>3</sup>	81,51 %
<b>Volume Armazenado</b>	81 m <sup>3</sup>	0,22 %
<b>Erro de Continuidade</b>	-28 m <sup>3</sup>	-0,08 %

O valor a observar de modo a quantificar a validade dos resultados é a percentagem correspondente ao erro de continuidade. Citando Rossman (2015), “ se o erro de continuidade excede um valor razoável, como 10 %, então a validade dos resultados da análise deve ser questionada”. Rossman (2015) explica que o erro de continuidade representa a diferença entre o volume de entrada mais o armazenamento inicial e o volume de saída mais o armazenamento final. Podemos verificar que nesta análise inicial não existem erros de continuidade excessivos, tanto no balanço ao escoamento nas conduatas como no balanço ao escoamento nas bacias, cujo valor de ambos é de -0,08 %. O valor negativo do erro de continuidade significa que o volume de saída mais o armazenamento final são maiores do que o volume de entrada em conjunto com o armazenamento inicial.

Relativamente às bacias (Quadro 3.1), dos 35,11 mm precipitados, 17,07 mm infiltraram-se no solo, 16,61 mm escoaram superficialmente até ao ponto de entrada na rede de drenagem e 1,46 mm ficaram armazenados nas depressões dos solos.

No que diz respeito ao escoamento nas conduatas (Quadro 3.2), dos 36189 m<sup>3</sup> de água que escoaram superficialmente e afluíram à rede de drenagem apenas 29499 m<sup>3</sup> alcançam o local de descarga da rede, sendo que 6637 m<sup>3</sup> foram “perdidos” por inundação. Como se pode observar 18,34 % da água que corre na rede de drenagem é inundada o que constitui um problema. Este problema pode ser resolvido, parcialmente ou na totalidade, diminuindo e atenuando o escoamento superficial mediante o uso de SUDS.

### 3.2.2 Identificação de Problemas

Na análise inicial verificou-se que aproximadamente 18 % do volume de água afluente à rede de drenagem é “perdido” por inundação. Devido à elevada quantidade de caixas de visita com problemas de inundação, decidiu-se identificar apenas as caixas de visita com maiores volumes de inundação. No Quadro 3.3 estão representados os volumes de afluência e inundação correspondentes às câmaras de visita com maiores volumes de inundação. As localizações e as áreas a montante de cada dispositivo estão ilustradas na Figura 3.11.

Quadro 3.3 - Volumes afluentes e de inundação das caixas de visita críticas

Caixa de visita	Volume Afluente	Volume Inundado
<b>837</b>	1460 m <sup>3</sup>	339 m <sup>3</sup> (23,22%)
<b>511</b>	1660 m <sup>3</sup>	274 m <sup>3</sup> (16,51%)
<b>292</b>	4340 m <sup>3</sup>	491 m <sup>3</sup> (11,31%)
<b>710</b>	2490 m <sup>3</sup>	217 m <sup>3</sup> (8,71%)
<b>699</b>	23600 m <sup>3</sup>	541 m <sup>3</sup> (2,29%)
<b>609</b>	7690 m <sup>3</sup>	175 m <sup>3</sup> (2,28%)

O Quadro 3.3 encontra-se ordenado pelo volume de inundação em relação ao volume afluente, isto é, no topo está a câmara de visita 837 em que 23,22 % do volume afluente é inundado. De seguida está a câmara de visita 511 com 16,51 % seguida pela câmara de visita 292 com 11,31 %, a câmara de visita 710 com 8,71%, a câmara de visita 699 com 2,29 % e por ultimo a câmara de visita 609 com 2,28 %.

As zonas consideradas para a implementação dos vários tipos de cenários (secção 3.2.3) serão as áreas residenciais a montante de cada câmara de visita especificada no Quadro 3.3. Como a área a verde claro (Figura 3.11) é constituída na maioria por edifícios comerciais e escolas, não será considerada para a implementação dos vários cenários. As áreas encontram-se representadas na Figura 3.11.

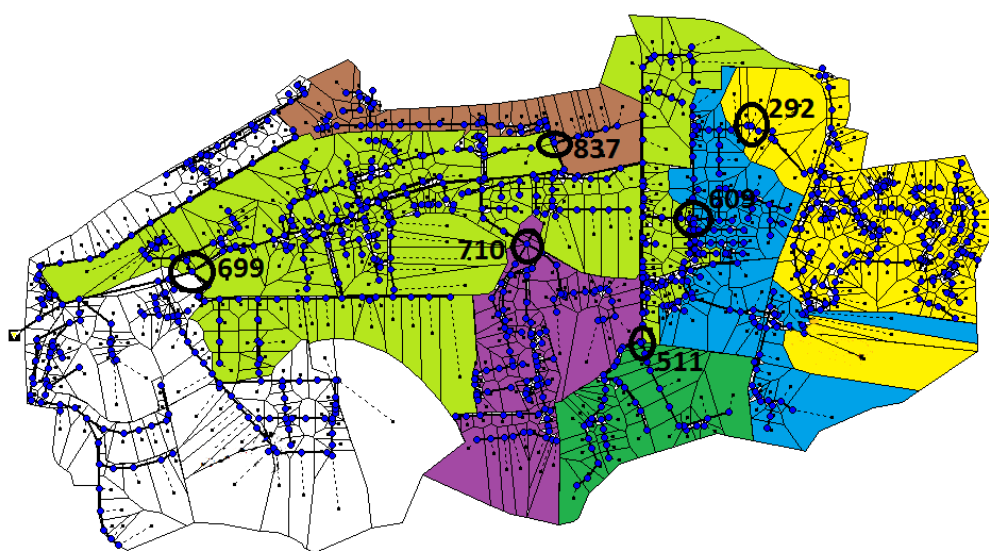


Figura 3.11 - Localização das câmaras de visita com maiores volumes de inundação e das respetivas áreas a montante

A área colorida a castanho corresponde à área a montante da câmara de visita 837, assim como a área a verde escuro corresponde à câmara de visita 511, a área a roxo à câmara de visita 710 e a área a amarelo à câmara de visita 292. A área a montante da câmara de visita 609

corresponde à área azul mais a área amarela e a área correspondente à câmara de visita 699 é o conjunto da área a verde claro com todas as áreas anteriores.

### 3.2.3 Cenários de estudo

Após a identificação das câmaras de visita problemáticas, foram estruturados vários cenários com o objetivo de solucionar os problemas identificados. Estes cenários são compostos por um tipo de SUDS ou uma combinação de dois tipos de SUDS. Os cenários de estudo são os seguintes:

- Cenário 1 – Desconexão de telhado



Figura 3.12 - Desconexão de telhado (Creeksmart@, 2017)

- Cenário 2 – Depósito de armazenamento de águas pluviais



Figura 3.13 - Depósito de armazenamento de águas pluviais ((ERAhbt@, 2017)



- Cenário 3 – Pavimento permeável



Figura 3.14 - Pavimento Permeável (SUDSnet@, 2017)

- Cenário 4 – Desconexão de telhado e Pavimento permeável
- Cenário 5 – Depósito de armazenamento de águas pluviais e Pavimento permeável

Como a área de estudo é composta por várias bacias com características diferentes, houve necessidade de considerar uma divisão da área impermeável comum a todas as bacias. Então, para efeito deste estudo considerou-se que a área impermeável de todas as bacias é constituída por telhados (50%), faixa de rodagem (35%) e passeio pedestre (15%) (Figura 3.15). Na Figura 3.16 está representada uma das bacias da área de estudo e podemos então observar que a divisão da área impermeável feita se aproxima o suficiente da realidade observada.

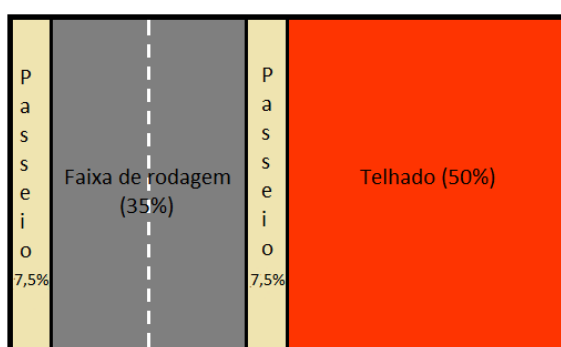


Figura 3.15 - Divisão da área impermeável



Figura 3.16 - Bacia da rede de estudo (Fonte: Google Earth)

### Cenário 1 – Desconexão de telhado

Neste cenário os telhados das zonas residenciais são desconectados, isto é, o escoamento proveniente dos telhados é redirecionado das áreas impermeáveis para áreas permeáveis de modo a potenciar a infiltração.

Foram considerados telhados com um coeficiente de rugosidade de 0,017 (as unidades deste coeficiente não são normalmente dadas, mas de maneira a balancear a equação de Manning, as unidades de 1 sobre o coeficiente de rugosidade devem ser  $m^{1/3}s^{-1}$  (Butler & Davies, 2011)), correspondente a telhas de barro (Chow, 1959). De modo a simplificar a análise, não foi considerado nenhum limite máximo para o caudal de drenagem. Para os restantes parâmetros foram utilizados os valores por defeito do SWMM.

Segundo Sample (2013), o limite máximo aconselhado de área de telhado associada a cada desconexão é de 92,9  $m^2$ . Então, o número de unidades a utilizar em cada bacia é calculada dividindo a área total de telhados por 92,9 e arredondando o resultado para cima. A área de cada unidade é calculada dividindo a área total de telhados de uma bacia por o número de unidades dessa bacia. Para a largura da superfície de cada unidade considerou-se uma área retangular com uma proporção de 2:1, sendo a largura o lado maior.

Não foi considerada qualquer nível de saturação inicial e a percentagem de área impermeável tratada é zero porque este tipo de SUDS apenas trata a precipitação que cai sobre ele.

Por fim, é necessário fazer um ajuste à percentagem de área impermeável de cada bacia seguindo o método exemplificado na Figura 3.2.

Os dados relativos à constituição da desconexão de telhados encontram-se no Quadro 3.4 e os dados relativos à implementação da desconexão de telhados no Quadro 3.5.

Quadro 3.4 - Dados relativos à constituição da desconexão de telhados

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Superfície do telhado</b>	Depressões	0	mm
	Rugosidade	0,017	-
	Declive	2	%
<b>Drenagem</b>	Limite de drenagem	Sem limite	mm/h

Quadro 3.5 - Dados relativos à implementação da desconexão de telhados

	Parâmetro	Valor	Unidade
Implementação	SUDS ocupa toda a bacia	Não	-
	Área de cada unidade	$A_{\text{Telh}} / N^{\circ} \text{ unidades}$	$\text{m}^2$
	Número de unidades	$A_{\text{Telh}} / 92,9$	-
	Largura da superfície por unidade	$\sqrt{(A_{\text{unid}}/2) \times 2}$	m
	% saturação inicial	0	%
	% de área impermeável tratada	0	%
	Direcionar o caudal de saída para área permeáveis	Sim	-

## Cenário 2 – Depósito de armazenamento de águas pluviais

Este cenário consiste na utilização de depósitos de armazenamento de águas pluviais para recolher o escoamento proveniente dos telhados e redireciona-lo para áreas permeáveis de modo a potenciar a infiltração.

Para determinar a melhor opção para o volume dos depósitos e quantos depósitos serão necessários por área de telhado, foi feito um estudo de pré-dimensionamento visando apenas a bacia 235, localizada a montante da câmara de visita 837 (Figura 3.17). Os volumes utilizados de cada depósito foram de 300, 500 e 1000 litros. Relativamente à drenagem, supôs-se um caudal de drenagem fixo de 1,5 litros por segundo num dreno situado no fundo do depósito e que estará sempre aberto.

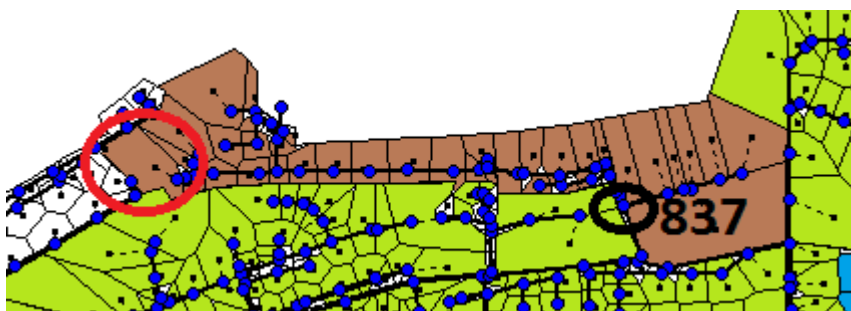


Figura 3.17 - Bacia 235 (círculo vermelho)

Em primeiro lugar procedeu-se à verificação do número de depósitos necessários para não ocorrer transbordo da água para depósitos de 300, 500 e 1000 litros, para escolher a melhor opção para o volume dos depósitos. De seguida apresentam-se os gráficos representantes do cálculo da quantidade necessária de depósitos para não ocorrer transbordo de água para cada tipo de depósito.

Na Figura 3.18 podemos observar que são necessários 15 barris de 1000 litros.

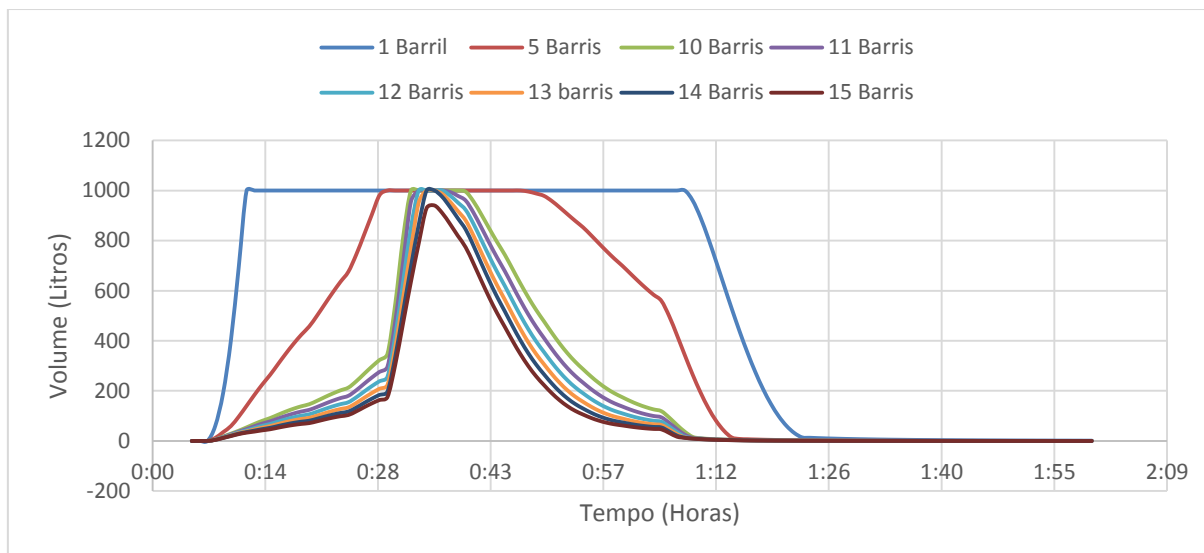


Figura 3.18 - Pré-dimensionamento dos barris de 1000 litros

Na Figura 3.19 podemos observar que são necessários 24 barris de 500 litros

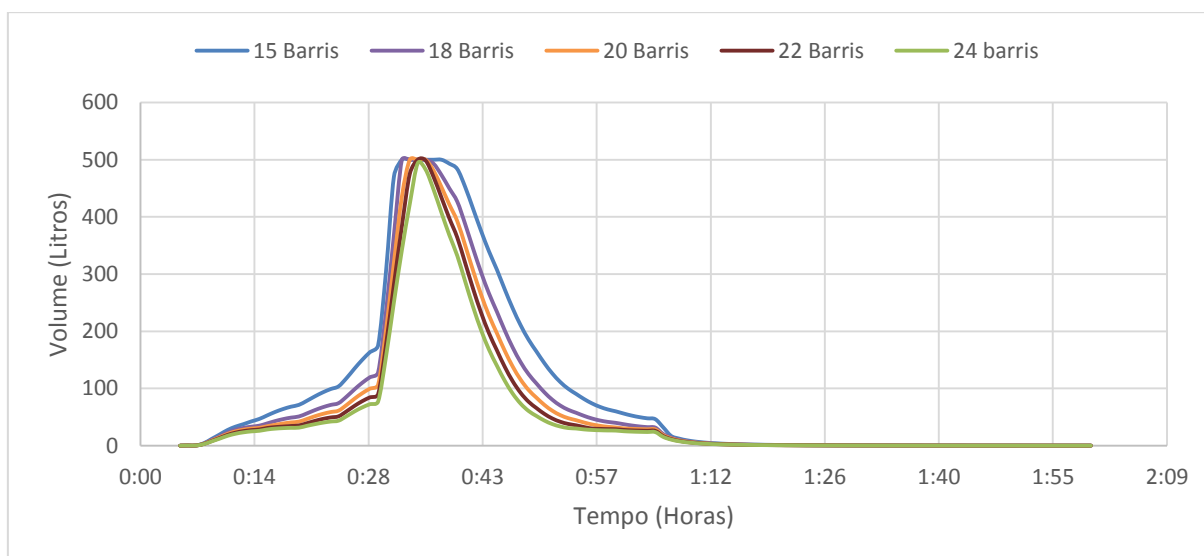


Figura 3.19 - Pré-dimensionamentos dos barris de 500 litros

Na Figura 3.20 podemos observar que são necessários 35 barris de 300 litros.

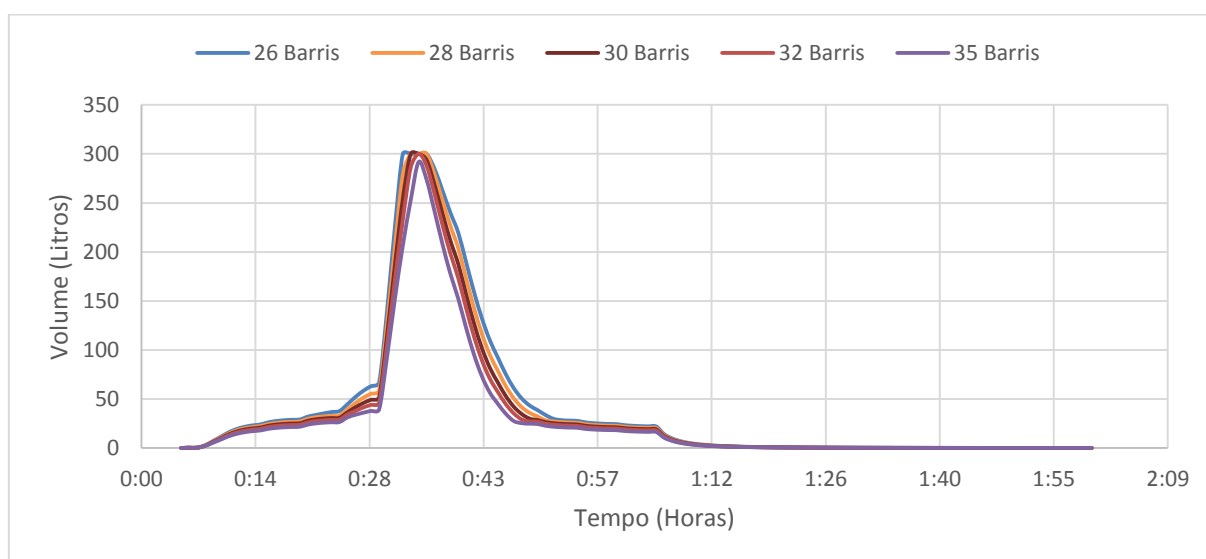


Figura 3.20 - Pré-dimensionamento dos barris de 300 litros

Considerando que bacia 235 tem aproximadamente 5777 m<sup>2</sup> de área e 70 % de área impermeável obtiveram-se os resultados do Quadro 3.6. Como foi referido anteriormente, os telhados consistem em 50 % da área impermeável de cada bacia.

Quadro 3.6 - Resultados do dimensionamento do depósito de armazenamento de água pluvial para a bacia 235

Volume do depósito	Quantidade de unidades	Área de telhado por unidade
<b>300</b>	35	57,77 m <sup>2</sup>
<b>500</b>	24	84,25 m <sup>2</sup>
<b>1000</b>	15	134,79 m <sup>2</sup>

Tal como as desconexões de telhado, foi imposto um limite máximo para a área de telhado correspondente a cada unidade. Sendo o limite é 92,9 m<sup>2</sup> e como se pretende optar pela solução que exija o menor numero de unidades por área de telhado, a solução escolhida foi a dos depósitos de 500 litros.

Pela Figura 3.21 observa-se que a bacia 235 tem 6 habitações, pelo que com a solução dos barris de 500 litros de volume obtém-se um total de 4 barris por habitação, o que se considera ser uma quantidade aceitável.

Para determinar o número de unidades para cada bacia restante divide-se a área correspondente aos telhados por 84,25 e arredonda-se o resultado para cima.



Figura 3.21 - Imagem de satélite da bacia 235 (Fonte: Google Earth)

No Quadro 3.7 encontram-se os dados relativos à constituição dos depósitos de armazenamento de águas pluviais e no Quadro 3.8 os dados relativos à implementação dos depósitos de armazenamento de águas pluviais.

Quadro 3.7 - Dados relativos à constituição do depósito de armazenamento de águas pluviais

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Armazenamento</b>	Altura do depósito	500	mm
<b>Drenagem</b>	Caudal de drenagem	1,5	l/s
	Altura do dreno	0	mm
	retardamento na drenagem	0	horas

Quadro 3.8 - Dados relativos à implementação do depósito de armazenamento de águas pluviais

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Implementação</b>	SUDS ocupa toda a bacia	Não	-
	Área de cada unidade	1	m <sup>2</sup>
	Número de unidades	$A_{Telh} / 92,9$	-
	Largura da superfície por unidade	0	m
	% saturação inicial	0	%
	% de área impermeável tratada	50	%
	Direcionar o caudal de saída para área permeáveis	Sim	-

### Cenário 3 – Pavimento permeável

Para este cenário, simulou-se a implementação de pavimentos permeáveis nos passeios pedestres da área de estudo. Como foi referido anteriormente, considerou-se que os passeios pedestres consistiam em 15 % da área impermeável de cada bacia.

O pavimento permeável utilizado é constituído por uma camada de pavimento de 100 milímetros de espessura com uma permeabilidade de 2500 mm/h (considerado por Woods-Ballard et al. (2015) um valor razoável para novos pavimentos), seguida de uma camada de armazenamento com 60 milímetros de espessura e uma capacidade de infiltração no solo igual ao caudal mínimo de infiltração utilizado no modelo HORTON (12 mm/h). A espessura da camada de armazenamento foi definida de modo a não atingir a capacidade máxima para o evento de precipitação utilizado (Figura 3.22).

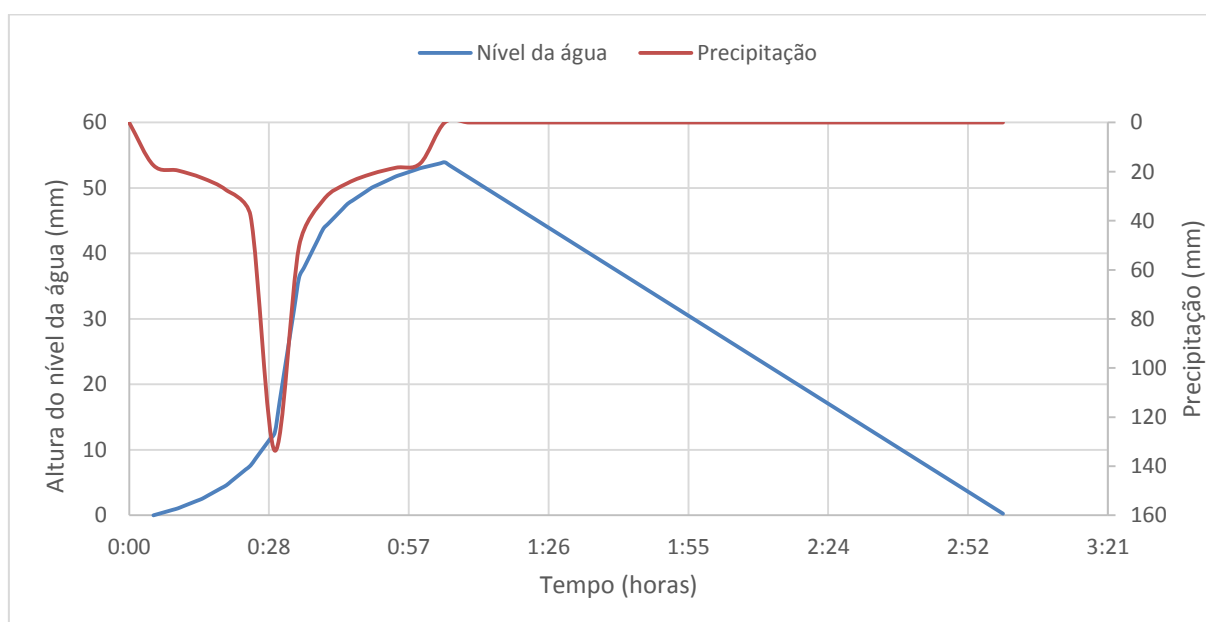


Figura 3.22 - Altura no nível da água na camada de armazenamento do pavimento permeável

Embora seja usual, não foi considerado uma camada de solo entre as duas camadas referidas anteriormente de maneira a simplificar a simulação. Foi também implementado um mecanismo de drenagem de 1,5 litros por segundo no topo da camada de armazenamento. Para os restantes parâmetros foram considerados os valores por defeito do SWMM.

Quadro 3.9 - Dados relativos à constituição do pavimento permeável

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Superfície</b>	Altura da berma	0	mm
	Fração do volume de vegetação	0	
	Rugosidade (n de Manning)	0,1	
	Declive	1	%
<b>Pavimento</b>	Espessura	100	mm
	Taxa de vazios	0,15	
	Fração de superfície impermeável	0,66	
	Permeabilidade	2500	mm/h
	Fator de colmatção	0	
<b>Armazenamento</b>	Espessura	60	mm
	Taxa de vazios (Vazios / Sólidos)	0,75	
	Taxa de infiltração do solo	12	mm/h
	Fator de colmatção	0	
<b>Drenagem</b>	Caudal de drenagem	1,5	l/s
	Altura do dreno	60	mm

Quadro 3.10 - Dados relativos à implementação do pavimento permeável

	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Implementação</b>	SUDS ocupa toda a bacia	Não	-
	Área de cada unidade	$0,15 \times A_{imper}$	m <sup>2</sup>
	Número de unidades	1	-
	Largura da superfície por unidade	$\sqrt{(A_{unid}/10)}$	m
	% saturação inicial	0	%
	% de área impermeável tratada	0	%
	Direcionar o caudal de saída para área permeáveis	Sim	-

#### **Cenário 4 – Desconexão de Telhado e Pavimento permeável**

Neste cenário foram aplicadas as desconexões de telhado especificadas no cenário 1 e os pavimentos permeáveis especificados no cenário 3.

Os dados relativos à desconexão de telhados encontram-se no Quadro 3.4 e no Quadro 3.5 e os dados relativos ao pavimento permeável no Quadro 3.9 e no Quadro 3.10.

#### **Cenário 5 – Depósito de armazenamento de água pluvial e Pavimento permeável**

Neste cenário foram aplicados os depósitos de armazenamento de água pluvial especificadas no cenário 2 e os pavimentos permeáveis especificados no cenário 3.

Os dados relativos aos depósitos de armazenamento de água pluvial encontram-se no Quadro 3.7 e no Quadro 3.8 e os dados relativos ao pavimento permeável no Quadro 3.9 e no Quadro 3.10.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo contém os resultados obtidos pelas simulações feitas no SWMM para cada um dos cenários descritos na secção 3.2.3. Em primeiro lugar são apresentados os resultados relativos a cada cenário e depois os resultados relativos a cada câmara de visita identificada na secção 3.2.2.

### 4.1 Validação dos resultados

Tal como foi feito para a análise da rede no seu estado inicial, é necessário avaliar os erros de continuidade de cada cenário de modo a validar os resultados (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Erros de continuidade dos diferentes cenários

Erro de continuidade (%)	Cenário				
	1	2	3	4	5
Erro de continuidade do escoamento em bacias	-0,10	-0,09	-0,10	-0,22	-0,11
Erro de continuidade do escoamento em condutas	-0,07	-0,06	-0,07	-0,07	-0,06

Todas as simulações obtiveram erros de continuidade abaixo dos 10%, o que indica que as simulações são de boa qualidade e possuem resultados válidos.

### 4.2 Análise dos Cenários de Estudo

Na secção 3.2.3 desta dissertação foram apresentados os vários cenários de estudo. De seguida apresentam-se os resultados da implementação desses cenários.

#### Cenário 0 (Inicial)

Na Figura 4.1 estão representados visualmente os volumes de inundação das câmaras de visita respetivos ao cenário inicial, estando estes especificados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 0 (inicial)

Cenário 0	Câmara de visita					
	837	511	292	710	699	609
Volume de Inundação (m <sup>3</sup> )	339	274	491	217	541	175



Figura 4.1 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 0 (inicial)

### Cenário 1 (Desconexões de Telhado)

Na Figura 4.2 estão representados visualmente os volumes de inundação das câmaras de visita respetivos ao cenário 1, estando estes especificados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 1 (Desconexões de Telhado)

Cenário 1	Câmara de visita					
	837	511	292	710	699	609
Volume de Inundação (m <sup>3</sup> )	138	111	82	98	176	0



Figura 4.2 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 1 (Desconexões de Telhado)

### Cenário 2 (Depósitos de Armazenamento de Águas Pluviais)

Na Figura 4.3 estão representados visualmente os volumes de inundação das câmaras de visita respetivos ao cenário 2, estando estes especificados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 2 (Depósitos de Armazenamentos de Águas Pluviais)

Cenário 2	Câmara de visita					
	837	511	292	710	699	609
Volume de Inundação (m <sup>3</sup> )	122	102	14	60	97	0



Figura 4.3 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 2 (Depósitos de Armazenamento de Águas Pluviais)

### Cenário 3 (Pavimentos Permeáveis)

Na Figura 4.4 estão representados visualmente os volumes de inundação das câmaras de visita respetivos ao cenário 3, estando estes especificados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 3 (Pavimentos Permeáveis)

Cenário 3	Câmara de visita					
	837	511	292	710	699	609
Volume de Inundação (m <sup>3</sup> )	261	213	331	172	493	80



Figura 4.4 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 3 (Pavimentos Permeáveis)

#### Cenário 4 (Desconexões de Telhados e Pavimentos Permeáveis)

Na Figura 4.5 estão representados visualmente os volumes de inundação das câmaras de visita respetivos ao cenário 4, estando estes especificados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 4 (Desconexões de Telhado e Pavimentos Permeáveis)

Cenário 4	Câmara de visita					
	837	511	292	710	699	609
Volume de Inundação (m <sup>3</sup> )	92	83	3	49	9	0



Figura 4.5 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 4 (Desconexões de Telhado e Pavimentos Permeáveis)

### Cenário 5 (Depósitos de Armazenamento de Águas Pluviais e Pavimentos Permeáveis)

Na Figura 4.6 estão representados visualmente os volumes de inundação das câmaras de visita respetivos ao cenário 5, estando estes especificados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 5 (Depósitos de Armazenamento de Águas Pluviais e Pavimentos Permeáveis)

Cenário 5	Câmara de visita					
	837	511	292	710	699	609
Volume de Inundação (m <sup>3</sup> )	65	61	0	9	0	0



Figura 4.6 - Representação visual dos volumes de inundação das câmaras de visita para o cenário 4 (Depósitos de Armazenamento de Águas Pluviais e Pavimentos Permeáveis)

### Análise geral

Como a implementação dos diversos SUDS é feita com o objetivo de reduzir o escoamento, que por sua vez tem impacto positivo nos problemas de inundação, são apresentados os volumes de escoamento superficial e de inundação da rede, respetivos a cada cenário (Quadro 4.8). De seguida são apresentados os valores relativos à percentagem de redução dos volumes de escoamento superficial e inundação entre os vários cenários e o cenário inicial (Quadro 4.9).

Quadro 4.8 - Volumes do escoamento superficial e inundação dos diferentes cenários

Volume	Cenário					
	Inicial	1	2	3	4	5
Escoamento superficial (mm)	16,61	13,22	12,93	15,49	12,10	11,81
Volume de Inundação (m <sup>3</sup> )	6637	3365	2839	5340	2539	2188

Quadro 4.9 - Percentagens de redução dos volumes de escoamento superficial e inundação dos diferentes cenários

Redução	Cenário				
	1	2	3	4	5
Escoamento superficial (%)	20,4	22,6	6,7	27,2	28,9
Volume de Inundação (%)	49,3	57,2	19,5	61,7	67,0

Relativamente aos cenários com implementação de um SUDS (Cenários 1-3), podemos observar que a performance das desconexões de telhado (cenário 1) e dos depósitos de armazenamento de águas pluviais (cenário 2) superam a performance da implementação de pavimentos permeáveis nos passeios pedestres (cenário 3). Isto deve-se, maioritariamente, à área atribuída a cada SUDS ser diferente, com as desconexões e os depósitos a estarem associados a 50 % da área impermeável (telhados) e os pavimentos permeáveis a apenas 15 % (passeios pedestres). A melhor performance do cenário 2 em relação ao cenário 1 já seria de prever, uma vez que os depósitos de armazenamento de águas pluviais também beneficiam de uma desconexão de telhado, mas com o extra de ter um depósito para atenuar o escoamento. Como é normal, os cenários 4 e 5 apresentam os melhores valores devido a serem uma combinação de dois SUDS, com o cenário 5 a obter os melhores resultados dos cinco cenários analisados.

De um modo geral, verifica-se o impacto positivo do uso de SUDS para reduzir o escoamento superficial, que se traduz em menores volumes de inundação mas conclui-se que a implementação de técnicas de drenagem sustentável de controlo na origem não é suficiente para resolver por completo os problemas de inundação existentes na área de estudo pelo que, tal como aconselhado por Butler & Davies (2011), será necessário usar técnicas complementares de drenagem mais abaixo na lista de SUDS da cadeia de gestão dos SUDS (secção 2.2.3).

### 4.3 Análise dos Volumes de Inundação das Câmaras de Visita

Na secção 3.2.2 desta dissertação foram identificadas as câmaras de visita com maiores volumes de inundação. De seguida apresentam-se os resultados representativos dos caudais afluentes e de inundação das várias câmaras de visita.

#### Câmara de visita 837

Na câmara de visita 837, no cenário inicial, 23,2 % do caudal afluente é “perdido” por inundação. Embora ainda se verifique volumes de inundação para qualquer cenário, no melhor dos cenários (cenário 5) apenas 9,4 % do volume afluente é inundado, ocorrendo uma redução de 80,8 % (Quadro 4.10).

Observando a Figura 4.7 pode-se verificar a redução do caudal afluente como consequência da aplicação dos vários cenários. Pela Figura 4.8 verifica-se que, mesmo no cenário com melhores resultados, ainda existe caudal de inundação, embora tenha ocorrido uma redução significativa do seu volume e tempo de ocorrência da inundação.

Quadro 4.10 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 837

Volume (m <sup>3</sup> )	Cenário					
	Inicial	1	2	3	4	5
<b>Afluente</b>	1460	911	904	1310	706	694
<b>Inundação</b>	339	138	122	261	92	65
<b>% Inundação</b>	23,2	15,2	13,5	19,9	13,0	9,4
<b>% redução do vol. inundação</b>	-	59,3	64,0	23,0	72,9	80,8

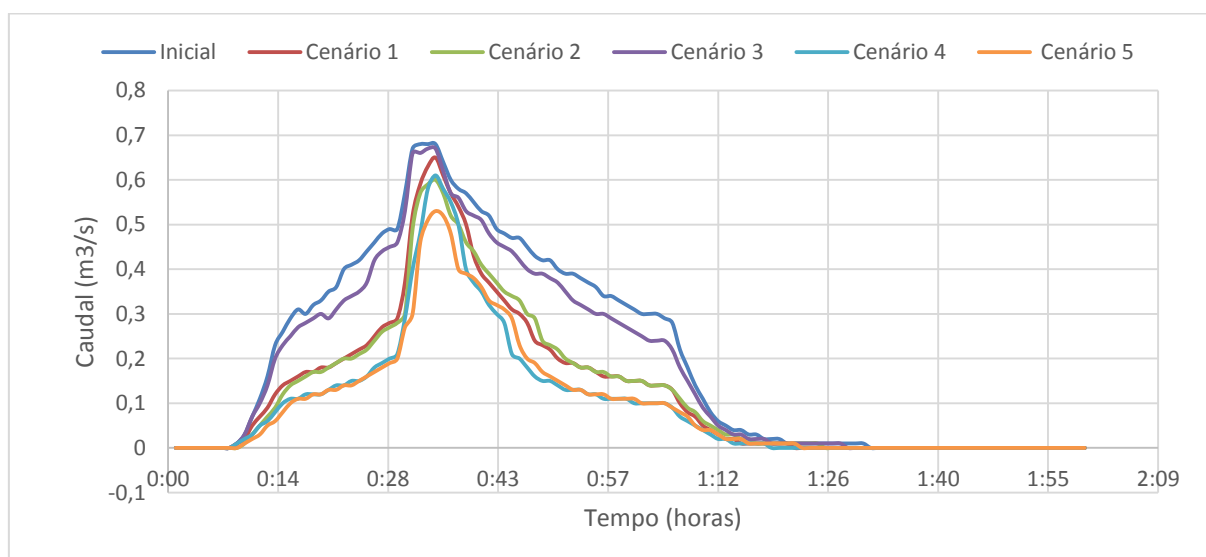


Figura 4.7 - Caudal afluente à câmara de visita 837 para os diferentes cenários

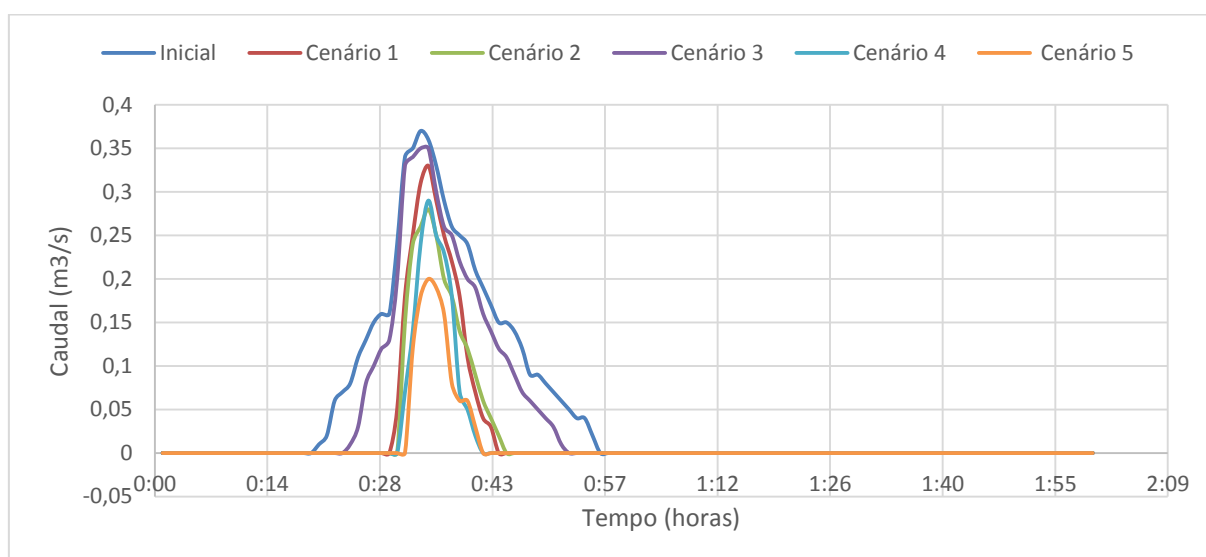


Figura 4.8 - Caudal de inundação da câmara de visita 837 para os diferentes cenários

### Câmara de visita 511

Inicialmente, 16,51 % do caudal afluente à câmara de visita 511 era “perdido” por inundação. À semelhança da câmara de visita 837, também nenhum dos cenários resolve por completo a situação de inundação. O cenário 5 obteve os melhores resultados, no qual 8,1 % do caudal afluente é inundado e ocorre uma redução de 77,7 % em relação ao cenário inicial (Quadro 4.11).

Quadro 4.11 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 511

Volume (m <sup>3</sup> )	Cenário					
	Inicial	1	2	3	4	5
<b>Afluente</b>	1660	1010	1010	1490	783	757
<b>Inundação</b>	274	111	102	213	83	61
<b>% Inundação</b>	16,5	11,0	10,1	14,3	11,9	8,1
<b>% Redução do vol. inundação</b>	-	59,5	62,8	22,3	69,7	77,7

Observando a Figura 4.9 pode-se verificar a redução do caudal afluente como consequência da aplicação dos vários cenários. Pela Figura 4.10 verifica-se que, mesmo no cenário com melhores resultados, ainda existe caudal de inundação, embora tenha ocorrido uma redução significativa do seu volume e tempo de ocorrência da inundação.



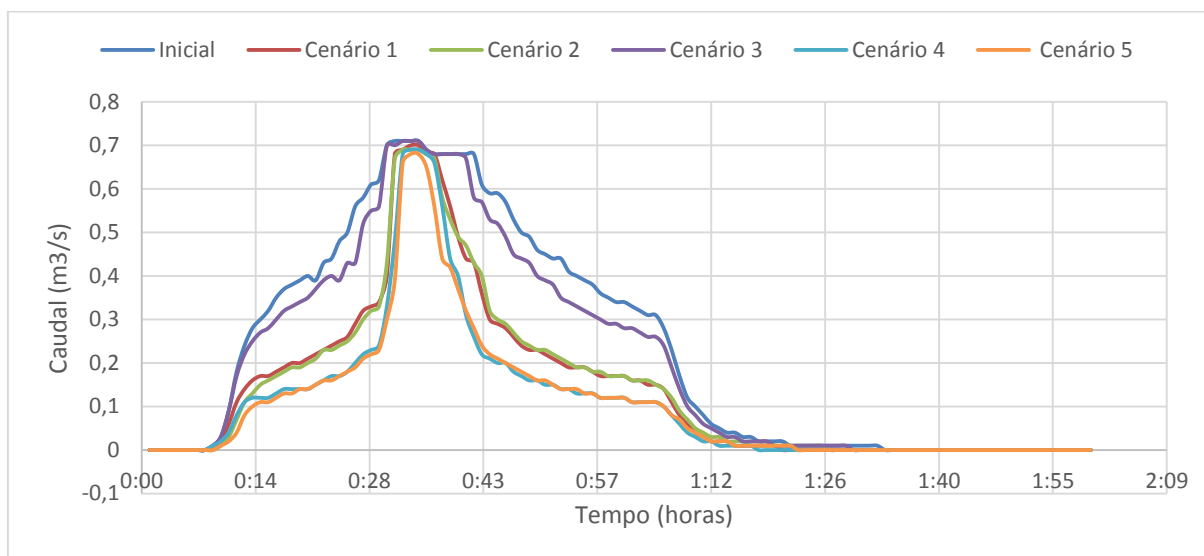


Figura 4.9 - Caudal afluente da câmara de visita 511 para os diferentes cenários

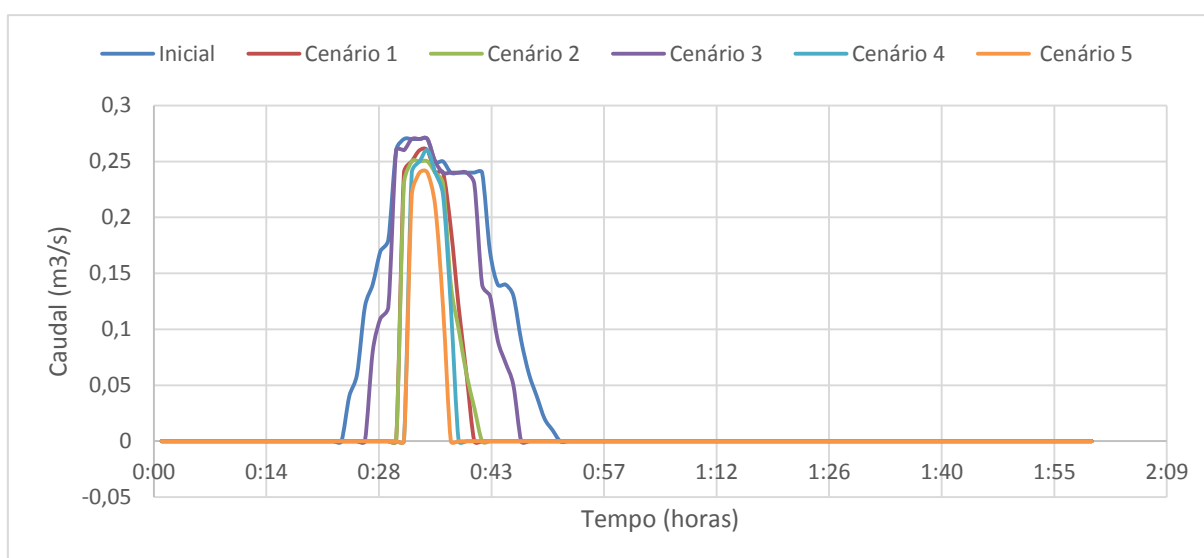


Figura 4.10 - Caudal de inundação da câmara de visita 511 para os diferentes cenários

### Câmara de visita 292

Antes da implementação dos vários cenários, aproximadamente 11% do caudal afluente à câmara de visita 292 transbordava, originando uma inundação. Com a implementação dos vários cenários observa-se uma redução significativa nos volumes de inundação. O cenário 5 consegue reduzir totalmente o volume de inundação e nos cenários 2 e 4 o volume de inundação corresponde a menos de 1 % do volume afluente (Quadro 4.12).

Quadro 4.12 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 292

Volume (m <sup>3</sup> )	Cenário					
	Inicial	1	2	3	4	5
<b>Afluente</b>	4340	2490	2370	3790	1840	1720
<b>Inundação</b>	491	82	14	331	3	0
<b>% Inundação</b>	11,3	3,6	0,6	8,7	0,2	0
<b>% Redução do vol. inundação</b>	-	83,3	97,1	32,6	99,4	100

Observando a Figura 4.11 pode-se verificar a redução do caudal afluente como consequência da aplicação dos vários cenários. Pela Figura 4.12 verifica-se que para o cenário 5 deixa de haver inundação e que para os outros cenários, com exceção do cenário 3, o volume de inundação é bastante reduzido assim como o seu tempo de ocorrência.

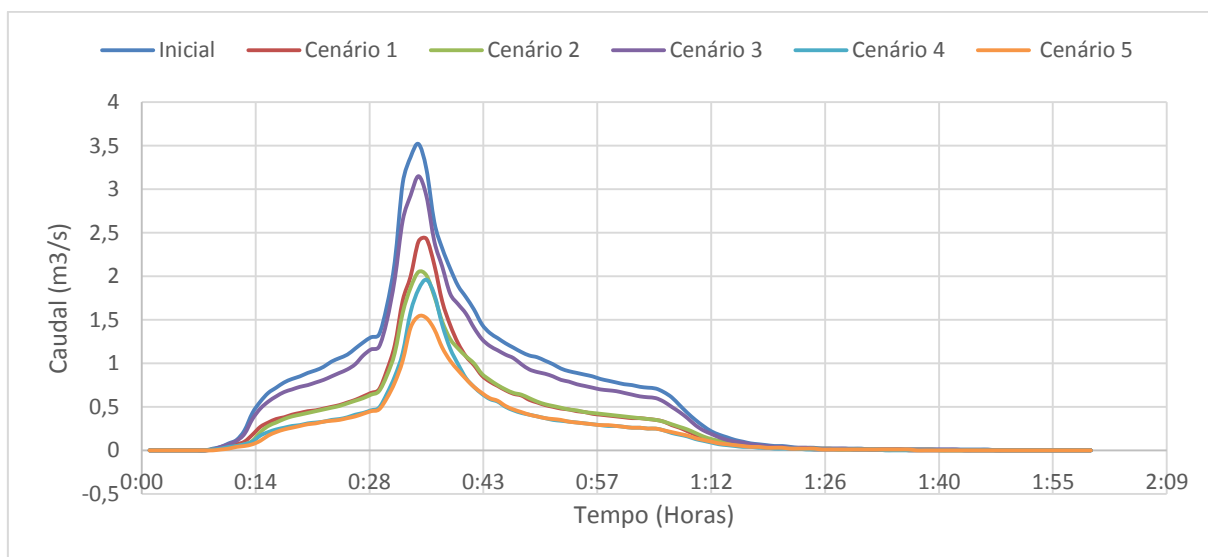


Figura 4.11 - Caudal afluente da câmara de visita 292 para os diferentes cenários

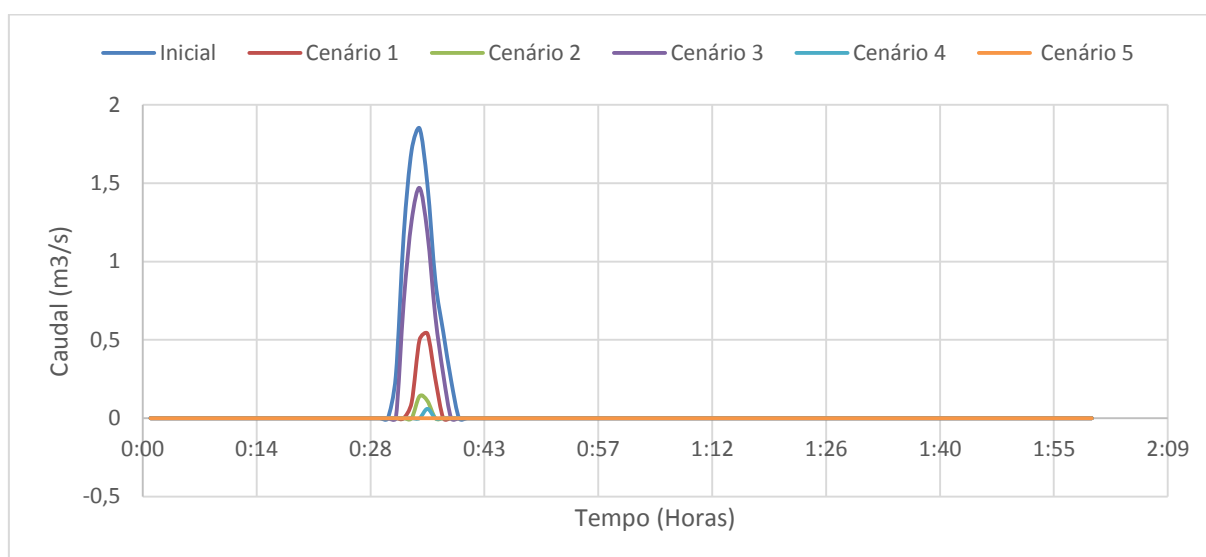


Figura 4.12 - Caudal de inundação da câmara de visita 292 para os diferentes cenários

### Câmara de visita 710

Antes da implementação dos vários cenários, aproximadamente 9 % do caudal afluente à câmara de visita 710 transbordava, originando uma inundação. Com a implementação dos vários cenários observa-se uma redução significativa nos volumes de inundação. O cenário 5 consegue reduzir o volume de inundação em 95,9 %, de forma que este passa a corresponder a menos de 1 % do volume afluente (Quadro 4.13).

Quadro 4.13 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 710

Volume (m <sup>3</sup> )	Cenário					
	Inicial	1	2	3	4	5
<b>Afluente</b>	2490	1530	1500	2210	1180	1120
<b>Inundação</b>	217	98	60	172	49	9
<b>% Inundação</b>	8,7	6,4	4	7,8	4,2	0,8
<b>% Redução do vol. inundação</b>	-	54,8	72,4	20,7	77,4	95,9

Observando a Figura 4.13 pode-se verificar a redução do caudal afluente como consequência da aplicação dos vários cenários. Pela Figura 4.14 verifica-se que, apesar de o caudal de inundação sofrer uma redução acentuada com a implementação dos vários cenários, ainda ocorre inundação mesmo para o cenário com melhores resultados, embora este já seja de volume e tempo de ocorrência reduzido.

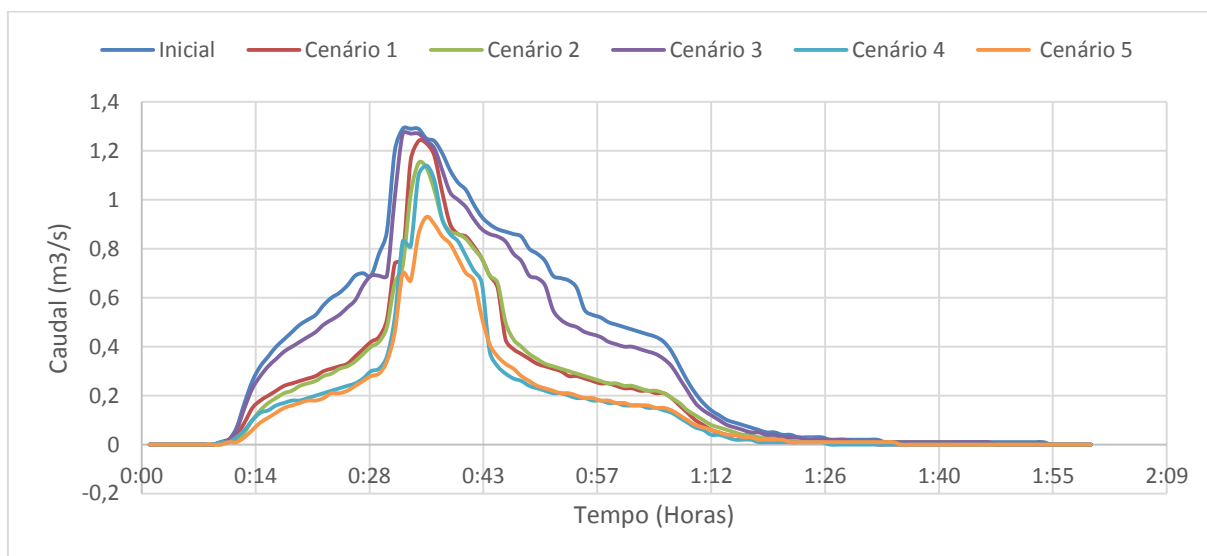


Figura 4.13 - Caudal afluente da câmara de visita 710 para os diferentes cenários

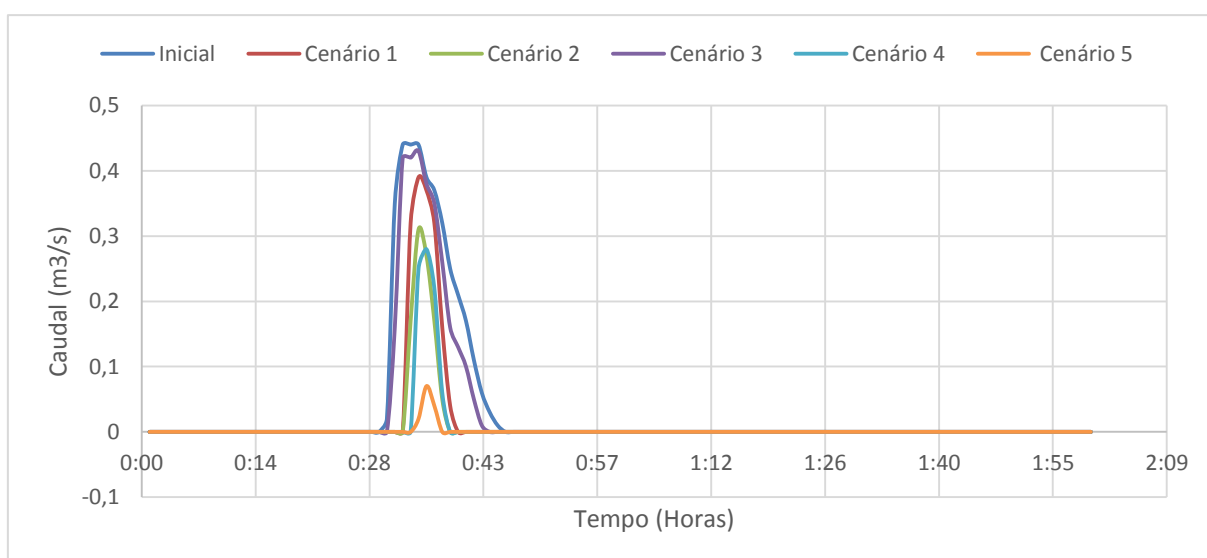


Figura 4.14 - Caudal de inundação da câmara de visita 710 para os diferentes cenários

### Câmara de visita 699

A câmara de visita 699 é a câmara mais a jusante das câmaras de visita analisadas e por isso é a câmara que tem maior caudal afluente. Apesar disso, apenas 2,29 % do caudal afluente é “perdido” por inundação. Com a implementação dos cenários 4 e 5 deixa de haver volume de inundação, e com os cenários 1 e 2 o volume de inundação corresponde a menos de 1 % do volume afluente (Quadro 4.14).

Quadro 4.14 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 699

Volume (m <sup>3</sup> )	Cenário					
	Inicial	1	2	3	4	5
<b>Afluente</b>	23600	19200	19000	22500	17400	17100
<b>Inundação</b>	541	176	97	493	9	0
<b>% Inundação</b>	2,3	0,9	0,5	2,2	0	0
<b>% Redução do vol. inundação</b>	-	67,5	82,1	8,9	98,3	100

Observando a Figura 4.15 pode-se verificar a redução do caudal afluente como consequência da aplicação dos vários cenários. Pela Figura 4.16 observa-se que para os cenários 4 e 5 ocorre uma redução total do caudal de inundação.

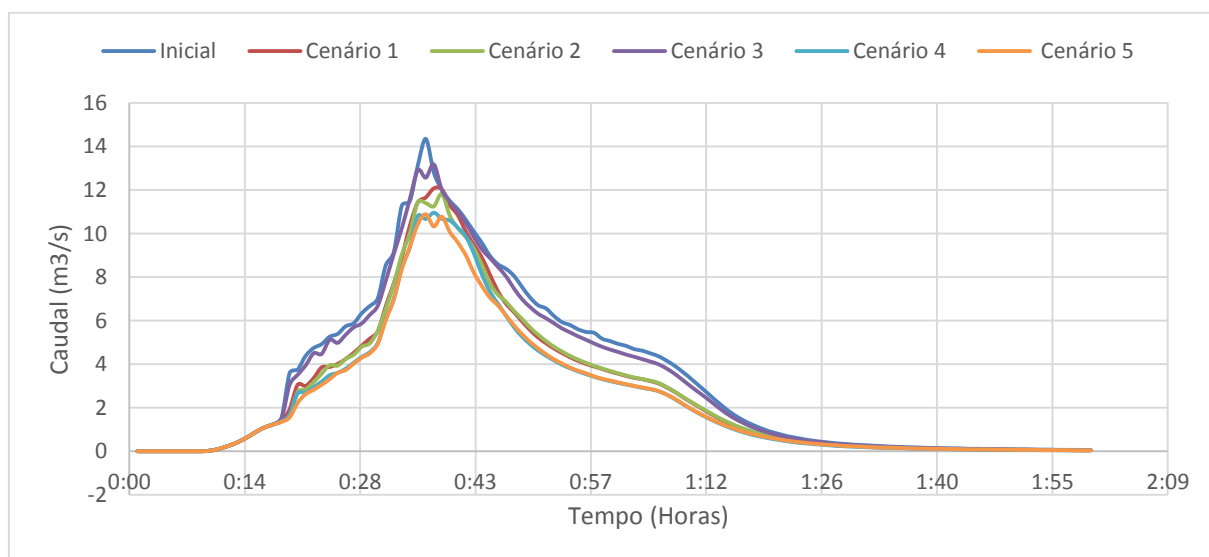


Figura 4.15 - Caudal afluente da câmara de visita 699 para os diferentes cenários

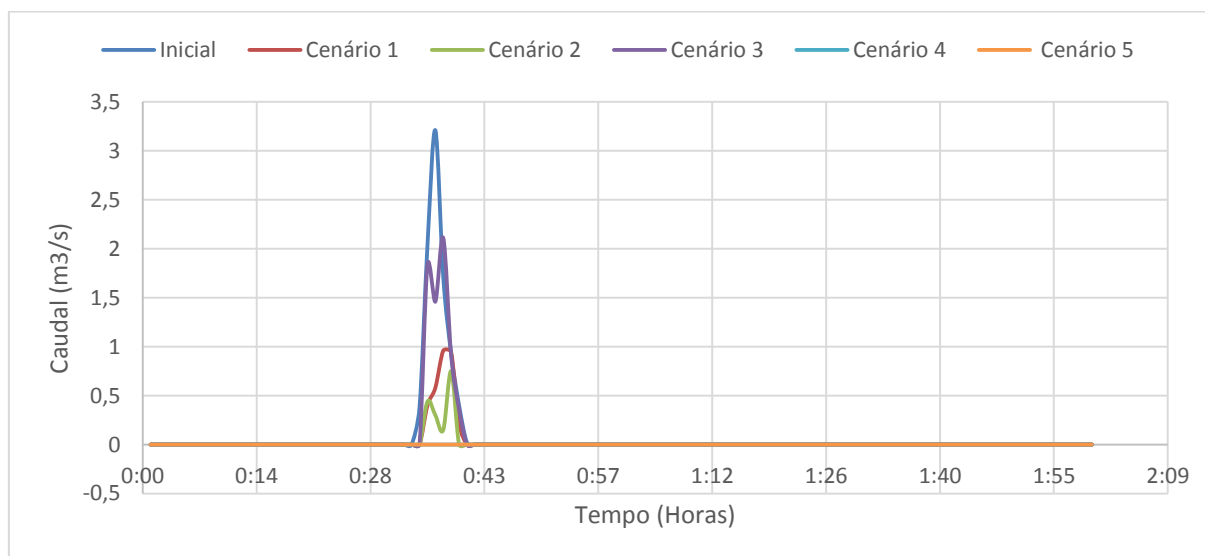


Figura 4.16 - Caudal de inundação da câmara de visita 699 para os diferentes cenários

### Câmara de visita 609

A câmara de visita 609 é a que apresentava a situação de inundação menos “grave”, com 2,28% do caudal afluente a se “perder” por inundação. Como tal, todos os cenários, com exceção do cenário 3, resolvem por completo a situação de inundação (Quadro 4.15).

Quadro 4.15 - Volumes de afluência e inundação da câmara de visita 609

Volume (m³)	Cenário					
	Inicial	1	2	3	4	5
<b>Afluente</b>	7690	4560	4350	6770	3400	3120
<b>Inundação</b>	175	0	0	80	0	0
<b>% Inundação</b>	2,3	0	0	1,2	0	0
<b>% Redução do vol. inundação</b>	-	100	100	54,3	100	100

Na Figura 4.17 podemos observar a redução do caudal afluente mediante a aplicação dos vários cenários e a Figura 4.18 diz respeito aos caudais de inundação.

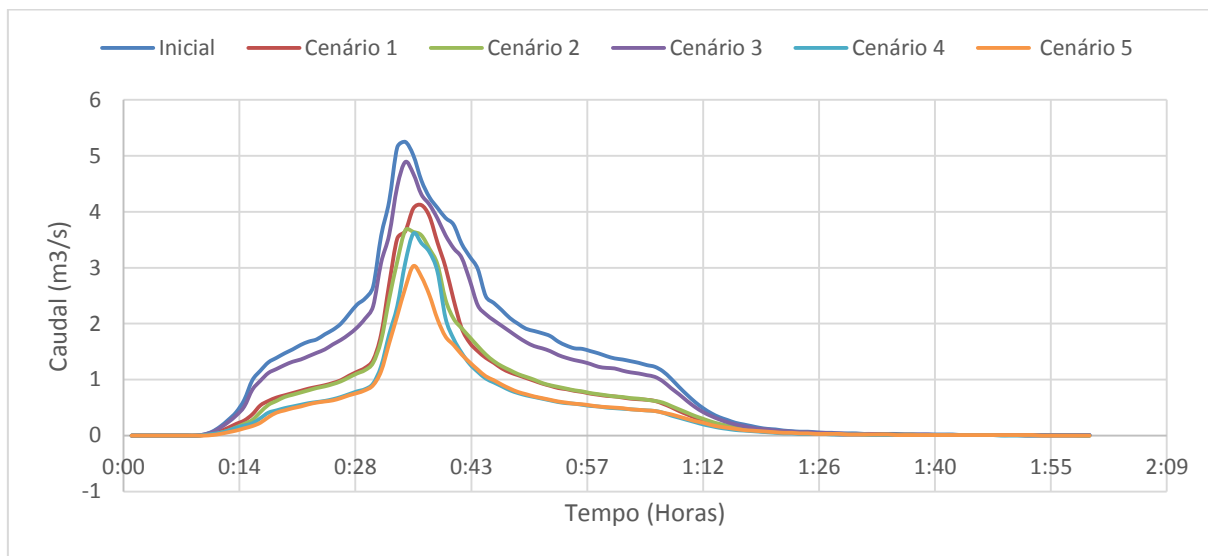


Figura 4.17 - Caudal afluente da câmara de visita 609 para os diferentes cenários

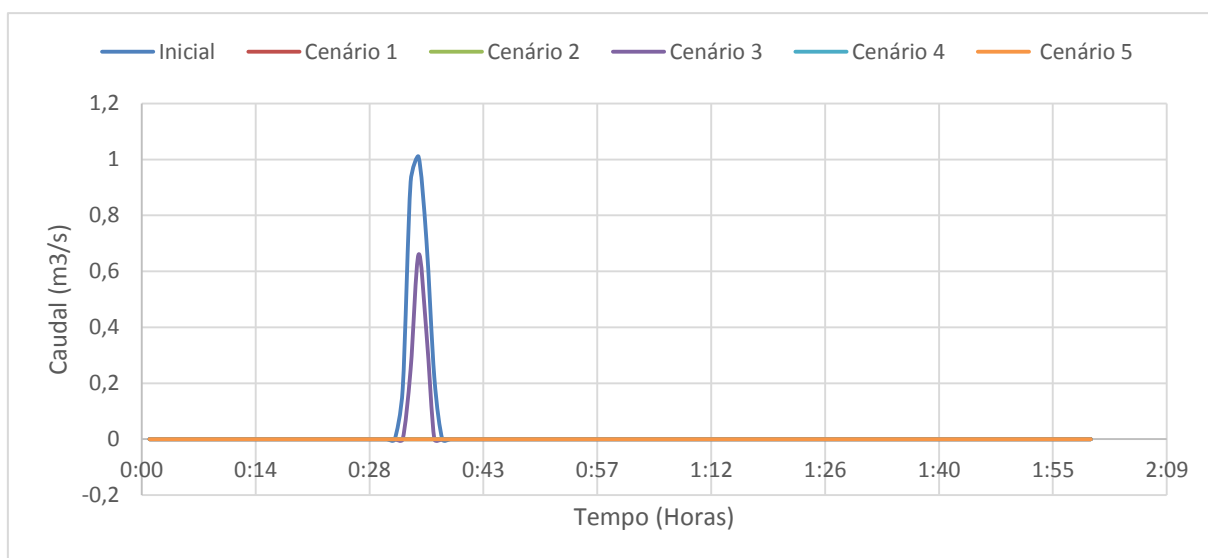


Figura 4.18 - Caudal de inundação da câmara de visita 609 para os diferentes cenários

### Análise geral

Aqui apresentam-se as percentagens de redução do volume de inundação para as câmaras de visita relativamente a cada cenário. Foram destacados a verde as reduções superiores a 75 % de maneira a facilitar a compreensão dos resultados.

Quadro 4.16 - Resultados da redução percentual do volume de inundação de cada câmara de visita relativamente a cada cenário

Cenário	Câmara de visita					
	837	511	292	710	699	609
1	59,3%	59,5%	83,3%	54,8%	67,5%	100%
2	64,0%	62,8%	97,1%	72,4%	82,1%	100%
3	23,0%	22,3%	32,6%	20,7%	8,9%	54,3%
4	72,9%	69,7%	99,4%	77,4%	98,3%	100%
5	80,8%	77,7%	100%	95,9%	100%	100%

Mais uma vez, no Quadro 4.16, as câmaras de visita encontram-se por ordem da percentagem de inundação em relação ao caudal afluente e, então, é visível a relação inversamente proporcional entre a criticidade da situação de inundação de uma câmara de visita e a percentagem de redução conseguida pela implementação de um SUDS, isto é, quanto menos crítica for a situação de inundação de uma câmara de visita mais “fácil” será resolver esse problema. Por exemplo, a câmara de visita 609, que é a câmara de visita em situação menos crítica (apenas 2,28 % do volume afluente é inundado), apresenta reduções de 100 % para qualquer cenário, com exceção do cenário 3, que tal como foi observado é o cenário que obteve os resultados menos satisfatórios. Na situação oposta está a câmara de visita 837 (inicialmente 23,22 % do volume que afluía a esta câmara era inundado) que mesmo para o cenário com melhores resultados (cenário 5) não obtém a total resolução do problema de inundação.

A exceção será a câmara de visita 292, que apesar de 11,31 % do caudal afluente se “perder” por inundação e estar numa situação mais crítica do que as câmaras de visita que lhe seguem, apresenta resultados bastante positivos para todos os cenários, sendo estes melhores do que os de algumas câmaras de visita em situação menos grave (710 e 699).

De um modo geral, pode ser observado que existe uma redução do caudal afluente a cada uma das câmaras de visita com a implementação dos diferentes cenários. Consequentemente são resolvidas as situações de inundação dependendo da criticidade da mesma na situação inicial.



## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Segundo Butler & Davies (2011) a drenagem de águas residuais em meio urbano é necessária devido ao uso de água para fins domésticos ou industriais, o que altera a sua composição e leva a que esta tenha que se drenada adequadamente e a drenagem de águas pluviais é necessária devido à cobertura do solo com superfícies impermeáveis o que origina grandes caudais de escoamento superficial. Inicialmente os sistemas de drenagem eram unitários, mas atualmente e segundo a legislação portuguesa, os sistemas construídos são do tipo separativo, o que pode originar que uma cidade tenha parte da rede em sistema unitário e outra parte em sistema separativo, ou seja um sistema misto.

Com a urbanização as áreas permeáveis dão lugar a áreas impermeáveis, o que tem consequências negativas na drenagem das águas pluviais. O escoamento superficial vai ser maior e mais repentino e a infiltração e a evapotranspiração vão ser menores. Com isto o risco de ocorrência de cheias aumenta e degradação da qualidade das águas também.

De acordo com relatórios da Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2017) e do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), na Europa, regra geral, os eventos de precipitação serão cada vez mais intensos. Nos locais de maior latitude a frequência das chuvas irá aumentar e nos locais de menor latitude irá diminuir.

São vários os termos associados à drenagem sustentável, tais como o SUDS, WSUD, LID e BMP, entre outros. Segundo Tim D. Fletcher et al. (2014), embora alguns termos representem conceitos e princípios gerais sobre todo o ciclo hidrológico e outros exprimam técnicas específicas e com foco nas águas pluviais, todos seguem duas máximas: a mitigação das mudanças na hidrologia e evolução do regime de escoamento para o estado mais natural possível e a melhoria da qualidade da água e redução de poluentes.

O termo SUDS (*Sustainable urban drainage systems*) teve origem no Reino Unido e significa Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável. Têm como objetivo formar uma rede de drenagem pluvial o mais natural possível (Ashley et al., 2015) e assentam em quatro pilares (Woods-Ballard et al., 2015): controlo da quantidade de escoamento superficial; prevenção da poluição gerada pelo escoamento superficial; promoção da amenidade nas cidades; proteção da biodiversidade.

São inúmeros e variados os benefícios dos SUDS: diminuição do risco de ocorrência de cheias; aumento da infiltração e da evapotranspiração; prevenção e diminuição da poluição gerada pelo

---

escoamento superficial; criação de reservas de água; proteção da biodiversidade; aumento da qualidade de vida nas cidades.

Os SUDS podem ter várias formas e funções. Segundo Woods-Ballard et al. (2015), os SUDS podem ser divididos em seis tipos de sistemas com as respetivas funções: sistemas de captação que têm como função captar a água pluvial; sistemas de superfícies impermeáveis cuja função é permitir a penetração da água numa superfície; sistemas de infiltração onde é facilitada a infiltração da água no solo; sistemas de condução onde o objetivo é conduzir a água na direção apropriada; sistemas de armazenamento onde a função é reter e armazenar a água; sistemas de tratamento cuja função é tratar a água. Um componente SUDS pode ser composto por um ou mais tipos de sistemas.

Woods-Ballard et al. (2015) defende que os SUDS devem ser utilizados como uma rede de drenagem sustentável (cadeia de gestão dos SUDS), onde são combinados vários tipos de sistemas dos SUDS. Devem ser utilizados SUDS para captar a água, outros para conduzir essa água para outros SUDS com capacidade de armazenamento e/ou tratamento. Butler & Davies (2011) aconselha que, na determinação de uma solução de drenagem sustentável, se encontre uma solução o mais próximo do local onde a chuva cai, e que no caso de não serem satisfeitas todas as necessidades de drenagem nesse ponto que se encontre uma solução complementar.

A modelação de sistemas de drenagem de águas pluviais pode ser dividida em dois principais modelos: O modelo hidrológico e o modelo hidráulico. O modelo hidrológico calcula as perdas da precipitação e o resultante escoamento superficial. O modelo hidráulico tem como dados de entrada os resultados do modelo hidrológico e modela o escoamento no sistema de drenagem (Leitão et al., 2008)

O SWMM é um modelo de simulação dinâmica hidrológica e hidráulica que simula a quantidade e a qualidade da água escoada num determinado instante ou ao longo do tempo (Rossman, 2015). No SWMM, uma rede de drenagem é constituída, principalmente, por bacias, câmaras de visita e condutas. A versão do SWMM utilizada foi a 5.1.012 que permite modelar o desempenho hidráulico de vários tipos de SUDS. Para cada SUDS, o SWMM permite definir vários parâmetros, sejam sobre o método de implementação ou sobre a sua constituição.

Esta dissertação estudou o impacto da implementação de vários tipos de SUDS sobre a quantidade do escoamento superficial. A área estudada foi a zona do Vale das Flores em Coimbra, uma área de 217,9 hectares, 51,4 % de áreas impermeáveis e com problemas de inundação. Foram identificadas as câmaras de visita com maiores problemas de inundação e estruturados cinco cenários com o objetivo de reduzir o escoamento superficial e consequentemente os volumes de inundação.

Cinco cenários foram analisados: (1) desconexões de telhados; (2) Depósitos de armazenamento de água pluvial; (3) pavimentos permeáveis; (4) desconexões de telhados e pavimentos permeáveis; (5) depósitos de armazenamento de água pluvial e pavimentos permeáveis.

Relativamente às câmaras de visita com maiores problemas de inundação, percebeu-se que quanto maior for a parcela de volume de inundação relativamente ao volume afluente, piores resultados serão obtidos com a aplicação dos SUDS. Foram várias as câmaras de visita que deixaram de apresentar volumes de inundação mediante a aplicação dos diferentes cenários. De um modo geral, em todas as situações foram obtidos resultados positivos para todas as câmaras de visita.

Os resultados demonstraram o impacto positivo da aplicação de SUDS na redução da quantidade de escoamento superficial e por consequência dos volumes de inundação. Verificou-se que a percentagem de área atribuída a cada tipo de SUDS tem um grande peso no resultado final. Obtiveram-se os melhores resultados para o cenário (5) depósitos de armazenamento de água pluvial e pavimentos permeáveis, com valores de 28,9 % de redução da quantidade de escoamento superficial e, por consequência, uma redução de 67 % nos volumes de inundação. Também se conclui que no caso na bacia estudada as técnicas de drenagem sustentável de controlo na origem não são suficientes para resolver os problemas de inundação pelo que seria necessário encontrar soluções complementares.

## **5.2 Limitações e Trabalhos Futuros**

No decorrer desta dissertação foram encontradas algumas limitações que condicionaram este estudo. O facto de a versão do SWMM que permite a modelação de SUDS ser relativamente recente fez com que o material de apoio sobre este assunto fosse escasso. Este facto também implicou a escassez de outros estudos com resultados para comparação.

Para trabalhos futuros, seria interessante analisar outros cenários, com outros tipos de SUDS e consequentemente, outras combinações. Após esta análise, poder-se-ia fazer a pormenorização das soluções.

Também seria de interesse avaliar o custo das várias soluções, tanto a nível de investimento inicial como do custo de manutenção. Calcular a resiliência da rede também teria interesse, assim como classificar o impacto real das inundações ocorridas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ashley, R., Woods-Ballard, B., Shaffer, P., Wilson, S., Illman, S., Walker, L., D'arcy, B., Chatfield, P. (2015). "UK sustainable drainage systems: past, present and future." *Proceedings of the ICE - Civil Engineering*, Vol 168, Issue 3, pp. 125–130.

Butler, D., & Davies, J. W. (2011). "Urban drainage". Spon Press, Nova York.

Chow, V. Te. (1959). "Open-channel hydraulics". Company, McGraw-Hill Book, Nova York.

Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). "Applied Hydrology". McGraw-Hill Book Company, Nova York.

Creeksmart@. (2017). Retirado de <http://www.creeksmart.org/assets/downspout-disconnection-slides/images/dd14.jpeg>

EEA. (2017). "Climate change, impacts and vulnerability in Europe: An indicator-based report" (Vol. 12/2012). Luxemburgo.

ERAhbt@. (2017). Retirado de <http://5.imimg.com/data5/DA/OG/MY-1856685/rainwater-harvesting-500x500.jpg>

Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). "Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art". *Advances in Water Resources*, Vol. 51, pp. 261–279.

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... Viklander, M. (2014). "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage". *Urban Water Journal*, Vol. 12, Issue 7, pp. 525–542.

IPCC. (2014). "Summary for Policymakers. Climate Change 2014: Synthesis Report". Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.

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

Lima, J. P. de, Marques, A. S., Sousa, J., Simões, N. E., & Pina, R. (2013). "Hidrologia Urbana: Sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas". Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos e Universidade de Coimbra, Lisboa.

Rossman, L. A. (2015). "Storm Water Management Model User's Manual". National Risk Management Laboratory Office, Cincinnati.

Sample, D. J. (2013). "Rooftop Disconnection", BMP Fact Sheet #1, Virginia Cooperative Extension, Publicação 426-130, pp. 1-5

Scholz, M. (2015). "Sustainable Drainage Systems". *Water*, Vol 7, pp. 2272–2274.

Storm-Water@. (2017). Retirado de <http://www.storm-water.co.uk/wp-content/uploads/2015/01/D-Rainclean-Capture.png>

SUDSnet@. (2017a). Retirado de [http://sudsnet.abertay.ac.uk/images/photos/Detention\\_basins/Jun24159.jpg](http://sudsnet.abertay.ac.uk/images/photos/Detention_basins/Jun24159.jpg)

SUDSnet@. (2017b). Retirado de [http://sudsnet.abertay.ac.uk/images/photos/permeable\\_paving/permeable paving on private road and driveways.jpg](http://sudsnet.abertay.ac.uk/images/photos/permeable_paving/permeable_paving_on_private_road_and_driveways.jpg)

SUDSnet@. (2017c). Retirado de <http://sudsnet.abertay.ac.uk/images/photos/Swales/Ardlerswale.jpg>

SUDSWales@. (2017). Retirado de <https://assets.sudswales.com/uploads/2011/06/infiltration-trench.jpg>

Wong, T. (2007). "Water sensitive urban design-the journey thus far". *Australian Journal of Water Resources*, Vol. 10, Issue 3, pp. 213–222.

Woods-Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). "The SUDS manual". CIRIA, Londres.

Zoppou, C. (2001). "Review of urban storm water models". *Environmental Modelling and Software*, Vol 16, Issue 3, pp. 195–231.