



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

# **Mitigação do Impacto das Alterações Climáticas na Drenagem Urbana**

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

Autor

**Diana Pinheiro dos Santos**

Orientador

**José Alfeu Almeida Sá Marques**

**Nuno Eduardo da Cruz Simões**

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

**Coimbra, julho, 2014**

## AGRADECIMENTOS

As minhas primeiras palavras de agradecimento têm de ir, forçosamente para a minha amiga Sara pela companhia e apoio durante todos estes anos, pois sem ela não teria chegado até aqui.

Aos meus pais, com todo o amor, carinho e grande sentido de responsabilidade que me inculcaram desde tenra idade.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Nuno Eduardo Cruz Simões e Professor Doutor José Alfeu Sá Marques, pela ajuda, disponibilidade e conhecimento transmitidos.

À minha amiga Sara Dias por me ter acompanhado nestes últimos anos com a sua incansável simpatia e carinho em todos os momentos.

À minha família pelo apoio e carinho que sempre me deram ao longo de toda a minha vida.

Aos professores, colegas e funcionários que me apoiaram num momento menos bom da minha vida dando-me proteção e força para não desistir.

A todos os colegas de curso que das variadas formas me ajudaram neste percurso suavizando a longa viagem que me encaminhou até ao trabalho que a seguir apresento.

Ao Engenheiro Pedro Garrett pela disponibilidade imediata e pelos artigos fornecidos.

Agradeço a M. Carmen Casas Castillo pela disponibilidade de esclarecimento de dúvidas e pelos fatores climáticos fornecidos.

A Andre Shardong pela disponibilidade em esclarecimento de dúvidas relativamente ao seu artigo.

Por fim a José Miguel BA e a Nuno Rodrigues trabalhadores da empresa A. Bapista de Almeida pela disponibilidade imediata e pelos dados fornecidos.

## RESUMO

Recentes inundações em todo o mundo mostram a vulnerabilidade do ambiente urbano às condições hidrológicas extremas. Inundações em ambiente urbano ocorrem principalmente devido a forte chuva e da incapacidade do sistema de drenagem para escoar toda a água superficial resultante da precipitação. O recente aumento de inundações urbanas resultados do efeito combinado das alterações climáticas e urbanização tem consequências devastadoras e dispendiosas (Butler e Davies, 2011). Consciente deste problema, a União Europeia implementou a Diretiva 2007/60/CE relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações e, recentemente, foi publicado um documento que define a estratégia portuguesa para adaptação às alterações climáticas (Paulino e Santos, 2013).

Segundo o IPCC (2013), em Portugal, a frequência de eventos climáticos extremos vai aumentar, especialmente no inverno. Espera-se que chuvadas com períodos de retorno 20 anos tenham frequência entre 15 e 18 anos em todos os cenários climáticos. Por outro lado, a sua intensidade irá aumentar cerca de 10% a 20% no período de inverno.

Esta dissertação utiliza o método proposto por Rodríguez *et al* (2014) e IPCC (2013) para traduzir o impacto das mudanças climáticas em curvas IDF. Com as curvas IDF adaptadas foi utilizado o método dos blocos alternados para gerar as chuvadas de projeto. O efeito das chuvadas é avaliado por um modelo de drenagem dual no SWMM. São utilizadas soluções de drenagem sustentável a fim de atenuar os picos de cheias e consequentes riscos.

As metodologias são aplicadas ao estudo do caso da bacia da Zona Central em Coimbra, Portugal. Esta bacia sofreu várias inundações recentemente (por exemplo, 2006/09/06, 25/10/2006, 21/09/2008 e 24/12/2013). A bacia tem uma área total de cerca de 1,5 km<sup>2</sup> e é altamente urbanizada. (Simões *et al*, 2010)

Estudaram-se duas soluções de forma resolver o problema das cheias com bacias de retenção. As bacias foram dimensionadas de acordo com os diversos cenários das alterações climáticas e avaliaram-se os seus custos.

## ABSTRACT

Recent floods all over the world show the vulnerability of urban environment to the extreme hydrological conditions. Floods in urban environment occur mainly due to heavy rain and the inability of the drainage system to drain all the water resulting from precipitation. The recent increase of urban floods results from the combined effect of climate change and urbanization and its consequences are devastating and costly (Butler e Davies, 2011). Concerned with this problem, the European Union created the directive 2007/60/CE on the assessment and management of flood risks and recently, it was published a document that defines the Portuguese strategy for adaptation to climate change (Paulino e Santos, 2013).

According IPCC (2013) in Portugal, the frequency of extreme weather events will increase, especially in winter. It is expected that a rainfall with a current return period of 20 years will have a frequency between 15 and 18 years in all climate scenarios. On the other hand, its intensity will increase about 10% to 20% in winter period.

This thesis uses the method proposed by Rodríguez *et al* (2014) and IPCC (2013) scenarios to access the impact of climate changes in IDF curves. With the new IDF curves, the alternating block method was used to generate the design storms. The effect of the storms is evaluated using a SWMM dual-drainage model. There will be used sustainable drainage solutions in order to attenuate the flood peaks and consequent risks.

All methodology is applied to Zona Central case study in Coimbra, Portugal. This catchment has suffered several flood events recently (e.g. 9/06/2006, 25/10/2006, 21/09/2008 and 24/12/2013). The catchment has a total area of approximately 1.5 km<sup>2</sup> and it is highly urbanised. (Simões *et al*, 2010)

Two solutions with retention basins were implemented to solve the floods problems. The retention basins were designed for the different scenarios of climate change and its costs were evaluated.

## ÍNDICE

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Estrutura da tese .....	3
2	Revisão Bibliográfica .....	4
2.1	Drenagem Urbana .....	4
2.1.1	Tipos de sistemas de drenagem.....	4
2.1.2	Risco de Inundação .....	6
2.1.3	Impacto da Urbanização na drenagem urbana.....	9
2.1.4	Alterações Climáticas .....	10
2.2	Modelos Climáticos .....	13
2.2.1	Modelos de Circulação Geral (GCMs) e Modelos Regionais (RCMs).....	13
2.2.2	Cenários climáticos.....	14
2.2.3	Precipitação.....	16
2.2.4	Estratégia de avaliação das Alterações Climáticas na precipitação .....	18
2.3	Modelação Hidrológica/Hidráulica .....	20
2.3.1	Modelos Hidrológicos.....	21
2.3.2	Modelos Hidrodinâmicos .....	28
2.4	Gestão das águas pluviais.....	33
2.4.1	Implicações das alterações climáticas na gestão de águas pluviais.....	33
2.4.2	Sistemas de Drenagem Urbanas Sustentáveis (SUDS) .....	34
3	Metodologia .....	41
3.1	Estudo de Caso .....	41
3.2	Metodologia .....	43
3.2.1	Introdução .....	43
3.2.2	Precipitação.....	43

---

3.2.3	Rede de drenagem dual .....	44
3.2.4	Adaptação das Curvas IDF às Alterações Climáticas .....	44
3.2.5	Implementação de bacias de retenção .....	47
3.2.6	Quantificação do custo das bacias de retenção.....	47
4	Exemplos de aplicação .....	50
4.1	Estudo de caso – Bacia da zona central de Coimbra .....	50
4.1.1	Introdução .....	50
4.1.2	Implementação das bacias no <i>software</i> SWMM.....	52
4.1.3	Soluções Implementadas .....	52
4.1.4	Resultados .....	53
4.1.5	Análise de Resultados.....	64
4.1.6	Instabilidades numéricas nos cálculos do SWMM .....	66
5	Conclusões/Trabalhos Futuros.....	67
5.1	Conclusões.....	67
5.2	Trabalhos Futuros.....	69
	Referências Bibliográficas .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Interface com o público e o meio ambiente (adaptado de Butler e Davies (2011)).	4
Figura 2.2 – Sistema de drenagem unitário (adaptado de Butler e Davies (2011)).	5
Figura 2.3 – Sistema de drenagem separativo (adaptado de Butler e Davies (2011)).	6
Figura 2.4 – Cheia Fluvial no rio Mondego, na cidade de Coimbra (Machado, 2013).	7
Figura 2.5 – Inundações provocadas pela chuvada do dia 18/02/2008 em Lisboa (Leitão <i>et al</i> , 2010).	8
Figura 2.6 – Efeito da urbanização no caudal de ponta de cheia (adaptado de Butler e Davies (2011)).	10
Figura 2.7 - Variação da anomalia da temperatura média à superfície relativamente ao valor médio do período de 1961 a 1990 (Butler e Davies, 2011).	11
Figura 2.8– Variação da precipitação média no período 1941-2012 (Lima <i>et al</i> , 2013).	12
Figura 2.9 – Aspetos envolvidos na análise do impacto das mudanças climáticas no ambiente hidrológico urbano (adaptado de Arnbjerg-Nielsen <i>et al</i> (2013)).	15
Figura 2.10 – Projeções da mudança da precipitação sazonal para três diferentes períodos do século XXI e para dois diferentes cenários de emissões A2 e B2 (Lope <i>et at</i> , 2005).	17
Figura 2.11 – Processos envolvidos nos modelos de drenagem urbana (adaptado de Clemens (2001)).	22
Figura 2.12 – Relação entre armazenamento superficial e inclinação do terreno (adaptado de Clemens (2001)).	23
Figura 2.13 – Valores médios mensais de evaporação em Castelo Branco para o ano de 2009 (adaptado de ESACB (2010)).	23
Figura 2.14 – Modelo do reservatório linear (adaptado de Clemens (2001)).	27
Figura 2.15 – Escoamento no <i>software</i> SWMM (EPA, 2012).	27
Figura 2.16 - Modelo de sub-bacia utilizado no SWMM (EPA, 2012).	28
Figura 2.17 – Fenda de Preissmann (Neves <i>et al</i> , 2001).	30
Figura 2.18 – Diferentes abordagens para um sistema em carga: (I) Perda de volume de água que atinge a superfície. (II) Aumento ilimitado da altura de água. (III) Adoção do modelo do reservatório (água é armazenada durante um período de tempo e regressa à rede quando existir novamente capacidade de escoamento nos coletores) (Marques <i>et al</i> , 2013).	30
Figura 2.19 – Drenagem Dual (adaptado de Djordjevic <i>et al</i> (1999)).	31
Figura 2.20 – Alteração no custo de extravasamento dos sistemas de drenagem para a cidade de Roskilde na Dinamarca quando a chuvada de projeto tem um aumento de 40% (adaptado de Willems <i>et al</i> (2012)).	34
Figura 2.21 – Objetivos dos SUDS (Adaptado de Woods-Ballard <i>et al</i> (2007)).	35
Figura 2.22 – Esquema de bacia de retenção (Woods-Ballard <i>et al</i> , 2007).	37

Figura 2.23 – Exemplos de bacias de retenção: a) Bacia seca do Chemim de Clères, França; b) Bacia com água permanente de Marne-la-Vallé, França. (Matias, 2006). .....	38
Figura 2.24 – Exemplo de bacia enterrada: Cisterna de Magazão (I.G.P.A.A., 2004). .....	38
Figura 2.25 – Bacia de retenção: a) On-Line; b) Off-Line (Lima <i>et al</i> , 2006). .....	39
Figura 2.26 – Sequência de gestão de SUDS (adaptado de Butler e Davies (2011)). .....	40
Figura 3.1 – Vista aérea da zona de estudo. A Praça da República assinalada a vermelho e a Praça 8 de Maio a amarelo. (SM@, 2014) .....	41
Figura 3.2 – Zona de estudo (Simões <i>et al</i> , 2010). .....	42
Figura 3.3 – Rede de drenagem superficial (Simões <i>et al</i> , 2010). .....	43
Figura 3.4 – Método dos blocos alternados para a adaptação 1 e para Tr = 100 anos. ....	45
Figura 3.5 - Método dos blocos alternados para a adaptação 2 e para Tr = 100 anos. ....	45
Figura 3.6 – Intensidade de precipitação para as cidades de Coimbra e Madrid. ....	46
Figura 3.7 – Método dos blocos alternados para a adaptação 3 e para Tr = 100 anos. ....	47
Figura 3.8 – Volume de betão necessário para diferentes alturas de bacia. ....	48
Figura 3.9 – Custo em euros do m <sup>3</sup> de betão. ....	49
Figura 3.10 – Custo em euros por m <sup>3</sup> de escavação. ....	49
Figura 4.1 – Vista aérea dos locais de implantação das bacias: I – Praça da República; II – Estacionamento em frente ao Mercado Municipal, e locais onde foram implementadas sondas numéricas para leitura de resultados. ....	51
Figura 4.2 – Caudal registado nos coletores (138.1 + 1_536.1) da Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 0. ....	54
Figura 4.3 – Caudal registado à superfície (138.A + PON_2047.A) da Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 0. ....	54
Figura 4.4 - Caudal registado nos coletores (308.1) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 0. ....	55
Figura 4.5 - Caudal registado à superfície (340.A) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 0. ....	55
Figura 4.6 - Caudal registado nos coletores (517.1+588.1) na entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos e a Praça 8 de Maio para a solução 0. ....	56
Figura 4.7 - Caudal registado à superfície (1_677.A) na Praça 8 de Maio para a solução 0. ....	56
Figura 4.8 - Caudal registado nos coletores (138.1 + 1_536.1) na Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 1. ....	57
Figura 4.9 - Caudal registado à superfície (138.A + PON_2047.A) na Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 1. ....	58
Figura 4.10 - Caudal registado nos coletores (308.1) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para e solução 1. ....	58
Figura 4.11 - Caudal registado à superfície (340.A) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 1. ....	59
Figura 4.12 - Caudal registado nos coletores (517.1+588.1) entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos na Praça 8 de Maio e para a solução 1. ....	59
Figura 4.13 - Caudal registado à superfície (1_677.A) na Praça 8 de Maio para a solução 1. ....	60



Figura 4.14 - Caudal registado nos coletores (138.1 + 1_536.1) na Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 2.....	61
Figura 4.15 - Caudal registado à superfície (138.A + PON_2047.A) na Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 2.....	61
Figura 4.16 - Caudal registado nos coletores (308.1) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 2.....	62
Figura 4.17 - Caudal registado à superfície (340.A) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 2.....	62
Figura 4.18 - Caudal registado nos coletores (517.1+588.1) entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos e a Praça 8 de Maio para a solução 2.....	63
Figura 4.19 - Caudal registado à superfície (1_677.A) na Praça 8 de Maio para a solução 2.....	63
Figura 4.20 – Custos das soluções para os vários cenários.....	65

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Período de retorno em função da ocupação urbana (adaptado de Marques <i>et al</i> (2013)).	9
Quadro 2.2 – Valores do período de retorno em função do risco e do tempo de vida útil de uma obra (Marques <i>et al</i> , 2013).....	9
Quadro 2.3– Sumário de cenários do SRES (adaptado de Willems <i>et al</i> (2012)).....	16
Quadro 2.4 – Fatores climáticos para a cidade de Madrid (Espanha) para o século XXI (Casas-Castillo e Rodríguez-Solà, 2014). .....	19
Quadro 2.5 – Quadro resumo da variação do aumento de intensidade de precipitação e precipitação para diferentes zonas e segundo diferentes autores. ....	20
Quadro 2.6 – Intervalo de variação para a capacidade de infiltração (adaptado de Clemens (2001)).	24
Quadro 2.7 – Percentagem efetiva e escoamento (modelo <i>Variable Percentage Runnoff</i> ) (Leitão <i>et al</i> , 2008). .....	25
Quadro 2.8 – Simplificações das equações de Saint-Venant. ....	29
Quadro 2.9 – SDUS: Dispositivos de controlo de origem.....	35
Quadro 2.10 – SDUS: Dispositivos de infiltração. ....	36
Quadro 2.11 – SDUS: Dispositivos de retenção. ....	36
Quadro 3.1 – Custo de construção de bacias.....	48
Quadro 4.1 - Soluções de locais de implementação de bacias de retenção.....	50
Quadro 4.2 – Características das bacias de retenção correspondentes a cada solução. ....	53
Quadro 4.3 – Percentagem de aumento de volume das bacias de retenção para as três soluções face às alterações climáticas.....	64
Quadro 4.4 – Custos das bacias para as diferentes soluções.....	65
Quadro 4.5 – Percentagens de aumento de custos.....	66

## ABREVIATURAS

AC – Alterações Climáticas

EPA – *Environmental Protection Agency*

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

GCMs – *General Circulation Models*

GEE – Gases de Efeito de Estufa

MDT – Modelo Digital do Terreno

RCMs – *Regional Circulation Models*

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

SRES – *Special Report on Emissions Scenarios of the IPCC*

SUDS – Sistemas de Drenagem Urbanos Sustentáveis

SWMM - *Storm Water Management Model*

UKWIR – *United Kingdom Water Industry Research*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A União Europeia consciente das alterações climáticas e dos consequentes eventos extremos que tais alterações irão ocasionar, particularmente ao nível das precipitações, publicou uma Diretiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2007, relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundação e ao combate e prevenção dos fenómenos de inundação, e refere entre diversos assuntos o seguinte: “As inundações podem provocar a perda de vidas humanas...”, “...as alterações climáticas contribuem para um aumento da probabilidade de ocorrência de inundações...”, “A diretiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu de 23 de Outubro de 2000, que estabeleceu um quadro de ação comunitária no domínio da política da água, exige a elaboração de planos de gestão das bacias hidrográficas para cada região hidrográfica, a fim de se atingir um bom estado ecológico e químico que contribuirá para a atenuação dos efeitos das inundações.”

A influência das alterações climáticas sobre a civilização humana constitui uma preocupação de vários peritos nesta área (Santos e Miranda, 2006). As variações do clima que o planeta Terra sofreu ao longo da sua existência exerceram grandes influências, positivas e negativas, nas civilizações e por vezes conduziram mesmo ao seu colapso. De acordo com Santos e Miranda (2006) citando de Menocal (2001), o império Acádia, na Síria, há cerca de 1170 anos colapsou devido a modificações no clima, assim como, o império Maia Clássico, na América Central entre os anos 750 e 900 da nossa era.

O crescimento populacional, a forte urbanização e desenvolvimento industrial provocaram um aumento na emissão de gases com efeito de estufa para a atmosfera terrestre modificando-a e agravando o fenómeno natural de alteração climática (Santos e Miranda, 2006).

A ocorrência de fenómenos de precipitação extrema é cada vez mais frequente, e as consequentes inundações representam uma ameaça real para a saúde pública e economia. É como tal do interesse da sociedade que se criem medidas de proteção eficientes contra as inundações a fim de se protegerem as populações, as infraestruturas e os ambientes aquáticos. (Butler e Davies, 2011)

O impacto das alterações climáticas e da urbanização traduz-se no aumento do caudal afluente aos sistemas de drenagem urbanos. Este aumento requer que sejam tomadas medidas de adaptação dos sistemas de drenagem urbana a fim de estes responderem às solicitações futuras (Butler e Davies, 2011).

Os efeitos das mudanças na precipitação poderão ser amplificados ou diminuídos tendo em conta as características dos sistemas de drenagem. Estudos demonstram que uma ligeira mudança nas chuvadas pode provocar mudanças drásticas nos sistemas de drenagem, como o aumento das sobrecargas dos mesmos. Um aumento de 5% na precipitação pode conduzir a um aumento da sobrecarga de nós da rede de 32%, isto para o caso particular de Bergisches Land, na Alemanha. Estes impactos dependem de dois fatores: capacidade hidráulica dos sistemas de drenagem para chuvadas extremas e topografia do terreno, ou seja, de região para região o impacto destas mudanças pode variar significativamente. (Willems *et al*, 2012)

O Painel Intergovernamental sobre as alterações climáticas define adaptação como “ajuste nos sistemas naturais ou humanos em resposta a estímulos reais ou estímulos climáticos esperados aos seus efeitos o que modera danos ou explora oportunidades benéficas” (IPCC, 2000).

O melhoramento das técnicas de drenagem urbana, a necessidade de estes serem economicamente sustentáveis, a necessidade da avaliação do impacto destes sistemas, assim como a necessidade de encontrar soluções mais sustentáveis são da responsabilidade de toda a sociedade nomeadamente de engenheiros, políticos e técnicos do ambiente (Butler e Davies, 2011).

## 1.2 Objetivos

Em Portugal, as inundações são responsáveis por grandes perdas materiais e vidas humanas, e tendo em consideração as alterações climáticas globais são de esperar significativas modificações nos regimes de precipitação, frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos e climáticos extremos, tais como, chuvadas intensas de curta duração (CIRAC, 2013).

Episódios locais de precipitação extrema, na cidade de Coimbra, causam sobrecarga dos sistemas de drenagem pluvial e/ou o aumento significativo do escoamento superficial conduzindo ao aparecimento de excesso de água à superfície em diversas zonas (Simões *et al*, 2010). Para esta cidade segundo IPCC (2013) é esperado um aumento dos eventos extremos de precipitação comparativamente ao presente.

Os objetivos desta dissertação são:

1. Estimar os efeitos das Alterações Climáticas nos eventos de precipitação extrema em Portugal.
2. Analisar o efeito das Alterações Climáticas em sistemas de drenagem urbana.

3. Analisar medidas de adaptação apropriadas para minimização dos efeitos das Alterações Climáticas na drenagem urbana.
4. Quantificar os custos das medidas de adaptação às alterações climáticas.
5. Aplicar as metodologias a um caso de estudo na zona Central de Coimbra.

### **1.3 Estrutura da tese**

No primeiro capítulo é feito um enquadramento geral ao tema da tese no qual se explicam os motivos essenciais da realização deste trabalho.

No segundo capítulo são apresentados os principais conceitos da drenagem urbana assim como os problemas que lhe estão associados. É dada especial importância ao tema da adaptação das curvas IDF face às alterações climáticas apresentando-se os mais recentes estudos neste âmbito. São apresentados alguns exemplos de dispositivos de drenagem urbana sustentável com particular destaque para as bacias de retenção/detenção.

No terceiro capítulo é apresentada a bacia da zona Central de Coimbra e as metodologias adotadas.

No capítulo quatro apresentam-se os desenvolvimentos para a obtenção dos modelos, soluções implementadas e respetivos resultados.

Por último são expostas as conclusões ao presente trabalho assim como também as suas potencialidades para aplicações em trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Drenagem Urbana

Os sistemas de drenagem têm por objetivo a recolha e transporte das águas residuais domésticas, industriais, comerciais e pluviais. A drenagem urbana consiste numa prioridade para a sociedade dado estar diretamente ligada à qualidade de vida e à segurança de pessoas e bens (Marques *et al*, 2013).

O impacto causado pela atividade humana nas áreas urbanas desenvolvidas sobre o ciclo natural da água leva à necessidade dos sistemas de drenagem urbanos. Esta interação tem duas componentes principais: as águas fornecidas para uso humano e industrial, e a cobertura do terreno com zonas impermeáveis que desviam a água da chuva do seu percurso natural. Estes dois tipos de interação dão origem a dois tipos de águas residuais para as quais se devem construir sistemas de drenagem. A Figura 2.1 mostra um esquema da interface da drenagem urbana com o público e o meio ambiente. (Butler e Davies, 2011)

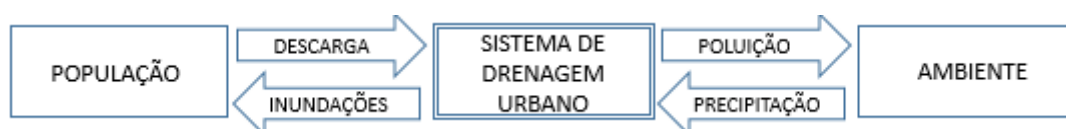


Figura 2.1 – Interface com o público e o meio ambiente (adaptado de Butler e Davies (2011)).

#### 2.1.1 Tipos de sistemas de drenagem

Os sistemas de drenagem urbanos segundo Marques *et al* (2013), podem ser classificados de acordo com as águas que transportam e podem sistematizar-se em:

- Sistemas unitários: Os sistemas são constituídos por uma única rede de coletores que transporta conjuntamente as águas residuais domésticas, industriais e pluviais.
- Sistemas separativos: Os sistemas são constituídos por duas redes de drenagem diferentes. Uma rede destinada às águas residuais domésticas e industriais e outra destinada à drenagem de água pluviais, sem ligação entre as duas redes.

- Sistemas mistos. Uma rede constituída pelos dois tipos de sistemas, unitários e separativos.
- Sistemas pseudo-separativos. Na inexistência de coletores pluviais, a ligação de águas pluviais de pátios interiores e terraços ao coletor de águas residuais domésticas é efetuada embora não seja permitida.

A razão da adoção dos diferentes tipos de sistemas tem sido alvo ao longo dos anos de discussão, sendo apontadas várias vantagens e desvantagens a cada um deles.

O grande inconveniente do sistema unitário (Figura 2.2) é a quando ocorrem grandes eventos pluviométricos que ultrapassam a capacidade do sistema e parte das águas residuais são enviadas para os cursos de água sem serem sujeitas a qualquer tipo de tratamento. Um outro problema é a dificuldade em manter-se as condições hidráulicas de escoamento em tempo seco (sedimentação das matérias em suspensão provocam odores desagradáveis e corrosão do material das condutas). Estes têm como principal vantagem o menor custo de investimento em relação ao sistema separativo. (Butler e Davies, 2011).

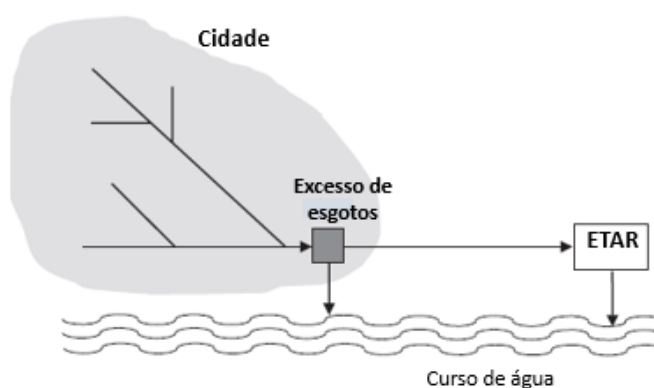


Figura 2.2 – Sistema de drenagem unitário (adaptado de Butler e Davies (2011)).

As vantagens dos sistemas separativos (Figura 2.3) em relação aos sistemas unitários, de acordo com Sousa (2001):

- Não são necessários sifões nas sarjetas, nos sumidouros ou em outros órgãos de entrada na rede.
- Não é necessário que os coletores de sistemas separativos de drenagem pluvial sejam construídos com materiais resistentes à corrosão.

- Menor afluência de grandes cargas poluentes à ETAR durante as primeiras chuvadas.
- Menor afluência de águas à estação de tratamento a jusante, o que corresponde a custos de construção e manutenção menores.

Os sistemas separativos contêm alguns inconvenientes nomeadamente o facto de a separação perfeita ser algo quase impossível de conseguir. Um outro e não menos grave problema deste tipo de sistema são as constantes e por vezes incontroláveis ligações ilegais das águas pluviais das casas diretamente no sistema de águas residuais domésticas. De acordo com Butler e Davies (2011), 40% das casas possuem ligação direta das águas pluviais ao sistema de águas residuais domésticas. Estudos comprovam que apenas uma em cem ligações ilegais é necessária para que seja anulada a vantagem em termos de poluição dos sistemas separativos em relação aos sistemas unitários (Butler e Davies, 2011).

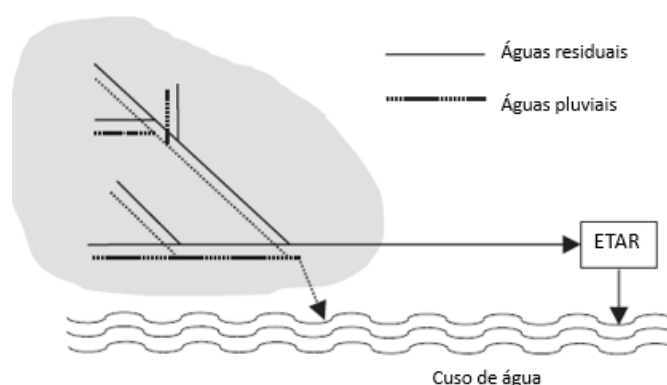


Figura 2.3 – Sistema de drenagem separativo (adaptado de Butler e Davies (2011)).

### 2.1.2 Risco de Inundação

O transbordo do sistema de drenagem, de acordo com Butler e Davies (2011), define-se como as inundações causadas por chuvadas extremas, que fazem com que a capacidade de carga do sistema seja excedida gerando-se assim um “caudal em excesso” na superfície urbana. Ainda segundo a Diretiva Comunitária 2007/60/CE relativa à avaliação do risco de inundação, define-se inundação como “cobertura temporária por água de uma área normalmente não coberta por água”.

As inundações de acordo com CIRAC (2013) podem ser de três diferentes tipos:



1. Inundações Fluviais resultantes de chuvas abundantes e/ou intensas que geram maior escoamento aumentando significativamente o caudal dos cursos de água promovendo inundações em margens de rios e áreas adjacentes.
2. Inundações Urbanas resultantes de chuva intensa e sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais. Estes fenómenos tendem a ocorrer em áreas relativamente pequenas de meios urbanos sob acumulação rápida de água.
3. Inundações Costeiras ocorrem quando a terra é inundada pela água do mar (ex.: *tsunami* ou maremoto).

Neste trabalho apenas serão estudados os problemas causados por inundações urbanas. Na Figura 2.4 apresenta-se um exemplo de uma cheia fluvial no rio Mondego, na cidade de Coimbra.



Figura 2.4 – Cheia Fluvial no rio Mondego, na cidade de Coimbra (Machado, 2013).

Os danos causados pelas inundações podem ser severos e atingir valores monetários muito elevados. O custo das cheias em Inglaterra e no país de Gales pode ter um aumento entre 1 a 10 mil milhões de libras até ao ano de 2080 se não forem tomadas medidas para resolver este problema (Evans *et al*, 2004)

A avaliação do risco deve ser feita combinando o conhecimento hidrológico sobre a frequência de diferentes tipos de chuvadas, com o conhecimento sobre modelação hidráulica, e a avaliação dos danos provocados por essas inundações (Butler e Davies, 2011).

Na Figura 2.5 encontra-se representada um exemplo de uma inundação urbana ocorrida na cidade de Lisboa (Portugal).



Figura 2.5 – Inundações provocadas pela chuvada do dia 18/02/2008 em Lisboa (Leitão *et al*, 2010).

De acordo com Marques *et al* (2013) citando Lencastre e Franco (1984) o risco de um caudal associado a um determinado período de retorno ser excedido num dado período de tempo de vida útil da obra  $n$  é dado pela equação (1).

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^n \quad (1)$$

Onde:

$R$  – Risco permissível.

$T_R$  – Período de retorno (anos).

$n$  – Vida útil da obra (anos).

O período de retorno associado a este risco é dado em função da ocupação urbana (Quadro 2.1). Assim, para projetos de áreas urbanas de grande importância foram já utilizados períodos de retorno de 50 ou até 100 anos. (Marques *et al*, 2013)

Quadro 2.1 – Período de retorno em função da ocupação urbana (adaptado de Marques *et al* (2013)).

<b>Tipo de ocupação</b>	<b>Período de retorno (anos)</b>
Residencial	2
Áreas comerciais	5
Áreas industriais	10
Áreas comerciais muito valorizadas	5 a 10

De acordo com Marques *et al* (2013), definido um risco admissível para uma dada obra pode-se calcular o período de retorno correspondente tirando partido da equação (1). O Quadro 2.2 apresenta valores do período de retorno em função do risco e do tempo de vida útil de uma obra.

Quadro 2.2 – Valores do período de retorno em função do risco e do tempo de vida útil de uma obra (Marques *et al*, 2013).

<b>Risco aceitável</b>	<b>Vida útil da obra (n)</b>						
	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>200</b>
0.01	995	1990	2985	3980	4975	9950	19900
0.10	95	190	285	380	475	950	1899
0.25	35	70	105	140	174	348	696
0.50	15	29	44	58	73	145	289
0.75	8	15	22	29	37	73	145
0.99	3	5	7	9	11	22	44

Pode então concluir-se que a escolha de um período de retorno requer uma análise aprofundada das consequências materiais, sociais, ambientais e humanas provocadas por eventos de cheia devendo ser feito um estudo económico com vista à sua estimativa (Marques *et al*, 2013).

### 2.1.3 Impacto da Urbanização na drenagem urbana

A urbanização é um processo que ocorre a nível mundial, com algumas diferenças entre continentes. As populações nas cidades tendem a aumentar sobretudo nos países em desenvolvimento. Esta deslocação de população para as cidades é normalmente feita de uma

forma descontrolada e as populações tendem a concentrar-se em áreas muito pequenas, o que provoca deficiências em muitas infraestruturas nomeadamente nos sistemas de saneamento. (Tucci, 2005)

Os fenómenos naturais como a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial são influenciados pela natureza da superfície do solo, como tal, a ocupação urbana com longas áreas impermeáveis tem um impacto significativo nestes processos. O inevitável aumento do escoamento superficial (Figura 2.6) consequente de uma baixa infiltração conduz a uma chegada rápida das águas aos cursos de água provocando um aumento do caudal de ponta de cheia. (Butler e Davies, 2011)

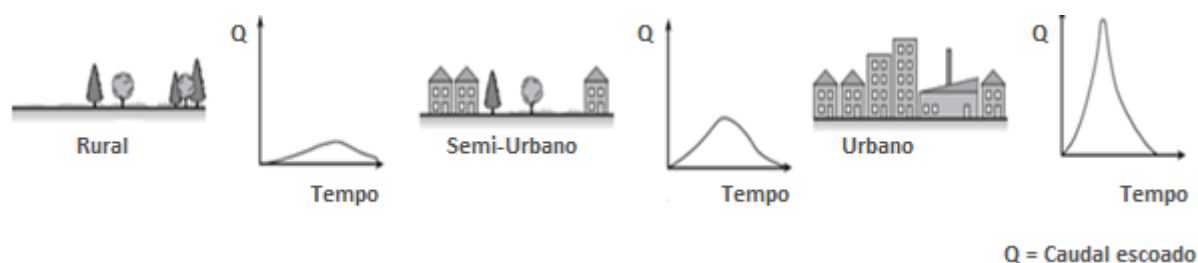


Figura 2.6 – Efeito da urbanização no caudal de ponta de cheia (adaptado de Butler e Davies (2011)).

Assim, os efeitos da urbanização na drenagem urbana são traduzidos pela constante substituição da drenagem natural pela drenagem artificial, sendo ultrapassadas algumas etapas do ciclo natural da água originando então maiores caudais de ponta de cheia nos cursos de água e uma maior poluição no meio ambiente (Tucci, 2005).

## 2.1.4 Alterações Climáticas

### 2.1.4.1 Principais causas e impactos das alterações climáticas

De acordo com o IPCC desde meados do século XX importantes mudanças na precipitação e na temperatura média à superfície do planeta têm ocorrido (Butler e Davies, 2011). A mudança climática pode ser definida como uma variação significativa do clima a uma escala global relativamente ao seu estado médio que persiste durante um intervalo de tempo extenso normalmente na ordem de décadas (Santos e Miranda, 2006).

A temperatura média global da atmosfera à superfície tem sido sujeita a um aumento de  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$  desde o início do século XX. A Europa é dos continentes mais afetados por este

aumento, sendo o valor médio de 0.95°C. Os registos mostram isso mesmo, sendo que cerca de 0.4°C deste aquecimento ocorreu desde dos anos 70 (Figura 2.7). (Santos e Miranda, 2006)

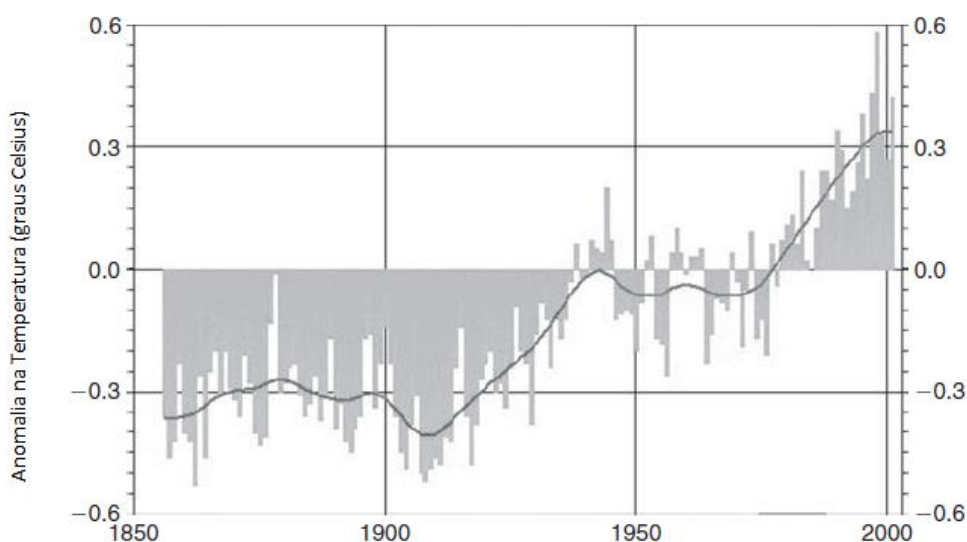


Figura 2.7 - Variação da anomalia da temperatura média à superfície relativamente ao valor médio do período de 1961 a 1990 (Butler e Davies, 2011).

Para este fenómeno têm contribuído os processos naturais internos ao sistema climático, as forças externas (como, por exemplo, variações na atividade solar), e também, em épocas mais recentes, as alterações antropogénicas na composição do sistema (Santos e Miranda, 2006).

Como causas primordiais das mudanças climáticas antropogénicas apontam-se as alterações na composição da atmosfera, em especial pelo aumento dos gases com efeito de estufa (GEE). Os gases com efeito de estufa mais importantes devido à sua capacidade de absorção e emissão de radiação infravermelha são: vapor de água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), clorofluorcarbonetos (CFCs), perfluorcarbonetos (PFCs), hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) e ozono (O<sub>3</sub>). As concentrações de alguns destes gases nomeadamente o dióxido de carbono, metano e óxido nitroso excedem agora em muito os valores pré-industriais (IPCC, 2000). A concentração de dióxido de carbono pré-industrial era de aproximadamente 270 ppm enquanto hoje ultrapassa as 360 ppm (Butler e Davies, 2011).

O recente 5º Relatório de Avaliação do IPCC conclui que o aumento do teor de vapor de água na baixa atmosfera provocado pelo aquecimento da atmosfera, alimenta os sistemas das tempestades com energia adicional que quando libertado como precipitação, amplifica a

intensidade dos eventos de precipitação extrema e consequentemente o aumento da probabilidade de cheias (IPCC, 2013).

Os impactos das alterações climáticas serão distintos nas diferentes partes do globo. Todos os continentes serão afetados por estas alterações, na África é provável que a desertificação se acelere no Sul, Norte e Oeste devido à diminuição da precipitação prevista; Na Ásia o aumento da intensidade e frequência dos furacões afetará sobretudo as zonas costeiras; Na América do Sul também se prevê uma diminuição da precipitação anual em particular na região da floresta do Amazonas. (Santos e Miranda, 2006)

Na Europa os fenómenos de precipitações extremas serão mais comuns. As regiões do Sul, onde se inclui Portugal, serão afetadas com uma diminuição da precipitação anual de cerca de 1% por década, e um aumento no inverno, pelo contrário, nas regiões do Norte prevê-se um aumento da precipitação de 1-2% por década. Estas diferenças far-se-ão sentir também entre estações, no Norte da Europa durante o Verão a precipitação terá um aumento de 2%, por outro lado, nas regiões do Sul prevê-se uma diminuição desta em cerca de 5%. O aumento do nível do mar na Europa até 2100 será de 2.2 a 2.4 vezes superior ao observado no século XX. (Santos e Miranda, 2006)

A variação da precipitação média regional em Portugal continental no período 1941-2012 encontra-se representada na Figura 2.8.

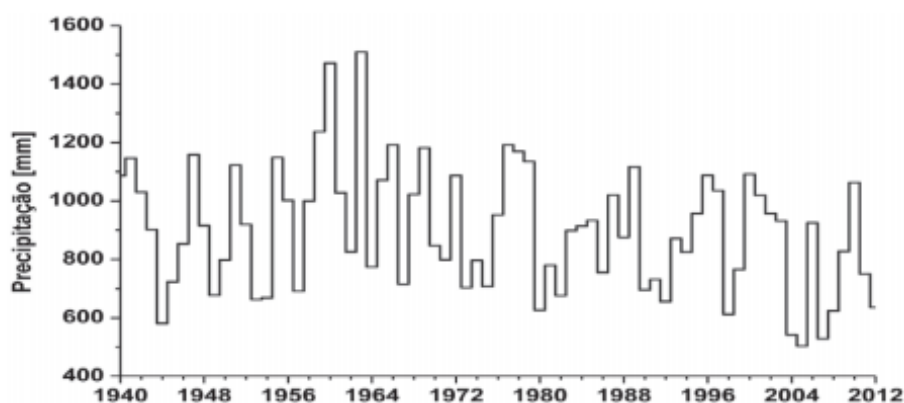


Figura 2.8– Variação da precipitação média no período 1941-2012 (Lima *et al.*, 2013).

#### 2.1.4.2 Impacto das alterações climáticas na drenagem urbana

Os aumentos esperados de precipitação afetam diretamente os sistemas de drenagem urbana. De acordo com Willems *et al* (2012) citando Berggren (2008) este aumento conduzirá ao aparecimento de vários tipos de problemas tais como os que se seguem:

- Danos em instalações e equipamento dos sistemas de drenagem urbanos e das habitações das cidades, tais como, danos em tubos, instalações, bombas hidráulicas, infraestruturas, erosão e deslizamento de terras.
- Aumento da concentração de poluentes na água devido ao aumento de temperatura previsto. Propagação dos poluentes, substâncias perigosas e nutrientes através da água, do solo e/ou do ar, que afetam o ambiente em geral e principalmente os ecossistemas em contacto com essas águas.
- O custo dos estragos e do tratamento do ambiente poluído.
- Desigualdade social provocada pela diferença espacial do impacto causado, onde algumas populações serão mais afetadas que outras.
- A saúde da população será afetada, pois um ambiente poluído instiga o aparecimento de doenças e até mesmo mortes.

## 2.2 Modelos Climáticos

### 2.2.1 Modelos de Circulação Geral (GCMs) e Modelos Regionais (RCMs)

A importância de se conhecer as mudanças climáticas futuras na atmosfera terrestre, a nível regional e global, levou à criação de modelos climáticos (Butler e Davies, 2011).

Os modelos climáticos GCMs (General Circulation Models) e os RCMs (Regional Climate Models) são capazes de simular o sistema climático terrestre através de uma malha tridimensional na qual estão associadas séries temporais, com uma resolução horizontal de cerca de 300 km no caso dos GCMs e na ordem de 30 a 50 km no caso dos RCMs, de acordo com Santos e Miranda (2006) citando Harvey (2000).

O objetivo no caso da drenagem urbana é estudar-se os efeitos das inundações tendo em conta as projeções das mudanças climáticas (Mark *et al*, 2008). A resolução espacial e temporal dos modelos GCMs e RCMs é demasiado grande para ser aplicada em drenagem urbana. As aplicações de drenagem urbana requerem dados relativos a uma área limitada, tipicamente estão limitados às fronteiras de uma cidade ou vila, assim como, informação sobre chuvadas de curta duração ou com duração igual ao tempo de concentração do sistema de drenagem (Willems *et al*, 2012).

### 2.2.2 Cenários climáticos

A avaliação do impacto das mudanças climáticas na drenagem urbana requer informação estatística de chuvadas extremas de curta duração para um dado período de retorno e para uma localização geográfica específica. Pode dizer-se que de certa forma estão envolvidos neste processo dois sistemas físicos, sendo eles, o sistema climático e o sistema de drenagem urbana, tal como se pode ver na Figura 2.9. (Clemens, 2001)

A Figura 2.9. ilustra os aspetos envolvidos na análise do impacto das mudanças climáticas no ambiente hidrológico urbano. Os fatores de alteração climática dos cenários climáticos (IPCC, SRES) e dos modelos de circulação geral (GCM's) são aplicados em dados históricos observados para gerar cenários futuros.

Para que se possam usar os dados climáticos gerados pelos RCM's em modelos de drenagem urbana, a resolução espacial e temporal tem de ser melhorada. O melhoramento é feito recorrendo a *downscaling* em que é feita uma transferência das mudanças nas características da precipitação de diferentes períodos de tempo futuros para uma série observada. (Mark *et al*, 2008)

Como referido, a ligação entre as escalas dos modelos climáticos e da drenagem urbana local, assim como a imprecisão em descrever fenómenos de precipitação extrema requer o auxílio de técnicas de *downscaling* (Willems *et al*, 2012). O *downscaling* é uma ferramenta usada para interpolação de variáveis a uma escala espacial para uma escala pontual (referentes a uma estação meteorológica), isto é, uma metodologia de diminuição da escala espacial de um modelo (Alves *et al*, 2003).

Os fenómenos de precipitação extrema locais depois da mudança de escala são avaliados e transferidos para os modelos hidrológicos urbanos (Schardong e Simonovic, 2013). Os modelos calibrados baseados em séries históricas de precipitação, são de seguida usados de acordo com os resultados obtidos dos modelos climáticos e *downscaling*, encontrando-se assim em condições de simular cenários de mudanças climáticas para uma determinada zona (Clemens, 2001).



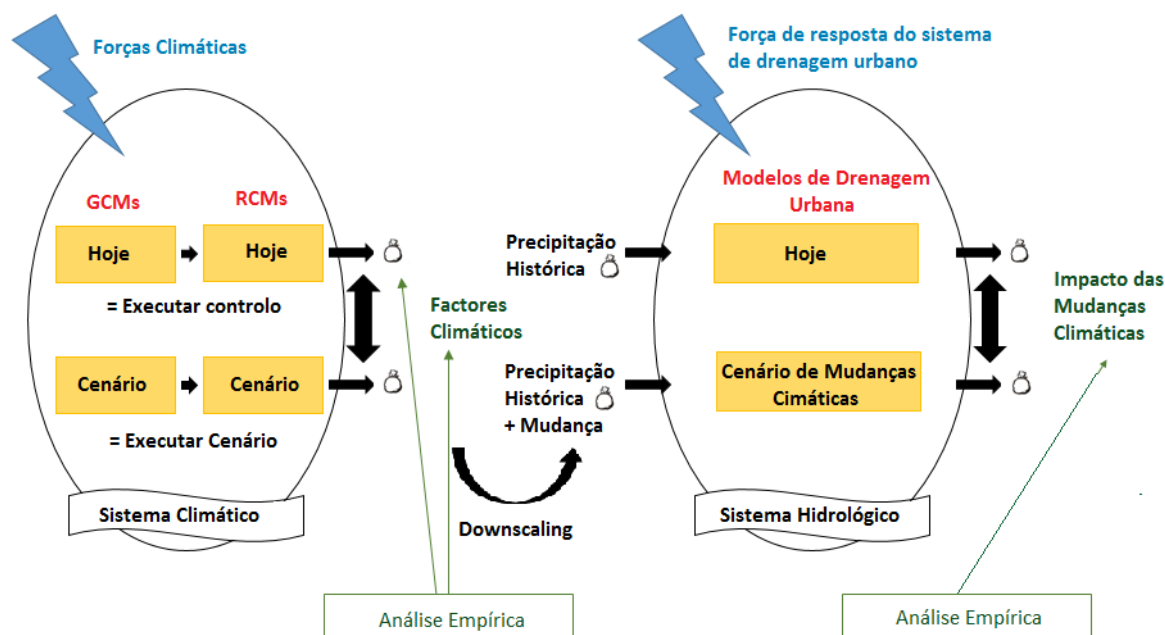


Figura 2.9 – Aspectos envolvidos na análise do impacto das mudanças climáticas no ambiente hidrológico urbano (adaptado de Arnbjerg-Nielsen *et al* (2013)).

Os cenários climáticos são imagens alternativas de como o mundo se pode modificar, e são uma ferramenta bastante útil na análise dos impactos, adaptação e mitigação das alterações climáticas. Diferentes cenários do futuro climático foram desenvolvidos para descrever a força e evolução da emissão de GEE determinadas de acordo com o desenvolvimento demográfico, socioeconómico e mudança tecnológica. (IPCC, 2000)

Os modelos climáticos podem simular os efeitos de diferentes cenários, envolvendo mudanças na concentração e emissão de GEE na atmosfera, assim como outras causas antropológicas e naturais (Clemens, 2001). Foram já desenvolvidos quatro diferentes cenários pelo IPCC (Quadro 2.3) através de um relatório especial sobre cenários de emissões (SRES) e pela indústria de pesquisa sobre a água do Reino Unido (UKWIR), em que cada um representa diferentes desenvolvimentos demográficos, sociais, económicos, tecnológicos e ambientais (Willems *et al*, 2012).

Quadro 2.3– Sumário de cenários do SRES (adaptado de Willems *et al* (2012)).

Cenário		Descrição
UKCIPO2	IPCC	
Altas Emissões	A1	Rápido crescimento económico, população atinge um pico a meio do século e decresce a partir daí. Rápida introdução de novas e mais eficientes tecnologias. Três subgrupos inseridos neste contexto: fóssil intensivo (A1F1), fontes de energia fóssil (A1T) e uso equilibrado de todas as forças (A1B).
Médias-Altas Emissões	A2	Mundo heterogéneo, preservação das identidades locais, contínuo crescimento da população. Progresso económico/tecnológico é mais fragmentado e lento que nos outros cenários.
Baixas Emissões	B1	População global como em A1, sociedade informada, tecnologias limpas e de recursos eficientes.
Médias-Baixas Emissões	B2	População global como em A2 mas com uma evolução mais lenta, desenvolvimento económico intermédio, desenvolvimento tecnológico mais diverso que em A1 e B1.

Mais recentemente foram apresentados no 5º Relatório do IPCC quatro novos cenários de concentração de GEE, os RCPs, mais complexos que os enunciados nos anteriores relatórios pois têm em consideração não só a quantidade de GEE emitidos como também o balanço da quantidade de radiação do sistema terrestre (IPCC, 2013). Estes novos cenários recebem os seus nomes a partir dos níveis de força radioativa, assim, um RCP-X implica um cenário no qual a força radioativa corresponde a  $X \text{ W.m}^{-2}$  (Silveira, 2013).

### 2.2.3 Precipitação

Os diferentes cenários climáticos revelam uma clara diminuição da precipitação anual para Portugal (Santos e Miranda, 2006). A precipitação anual projetada (Figura 2.10) para o período de 2070 a 2100 decresce evidentemente para os cenários A2 e B2 (Lope *et al*, 2005). A precipitação aumenta no Inverno 20%-50% em relação ao período de controlo (1961-1990), e decresce nas restantes estações do ano (Santos e Miranda, 2006). A precipitação acumulada em dias de precipitação intensa (10mm/dia) tende a aumentar em dias de precipitação intensa, sendo mais evidente nos meses de Inverno. (Santos e Miranda, 2006)

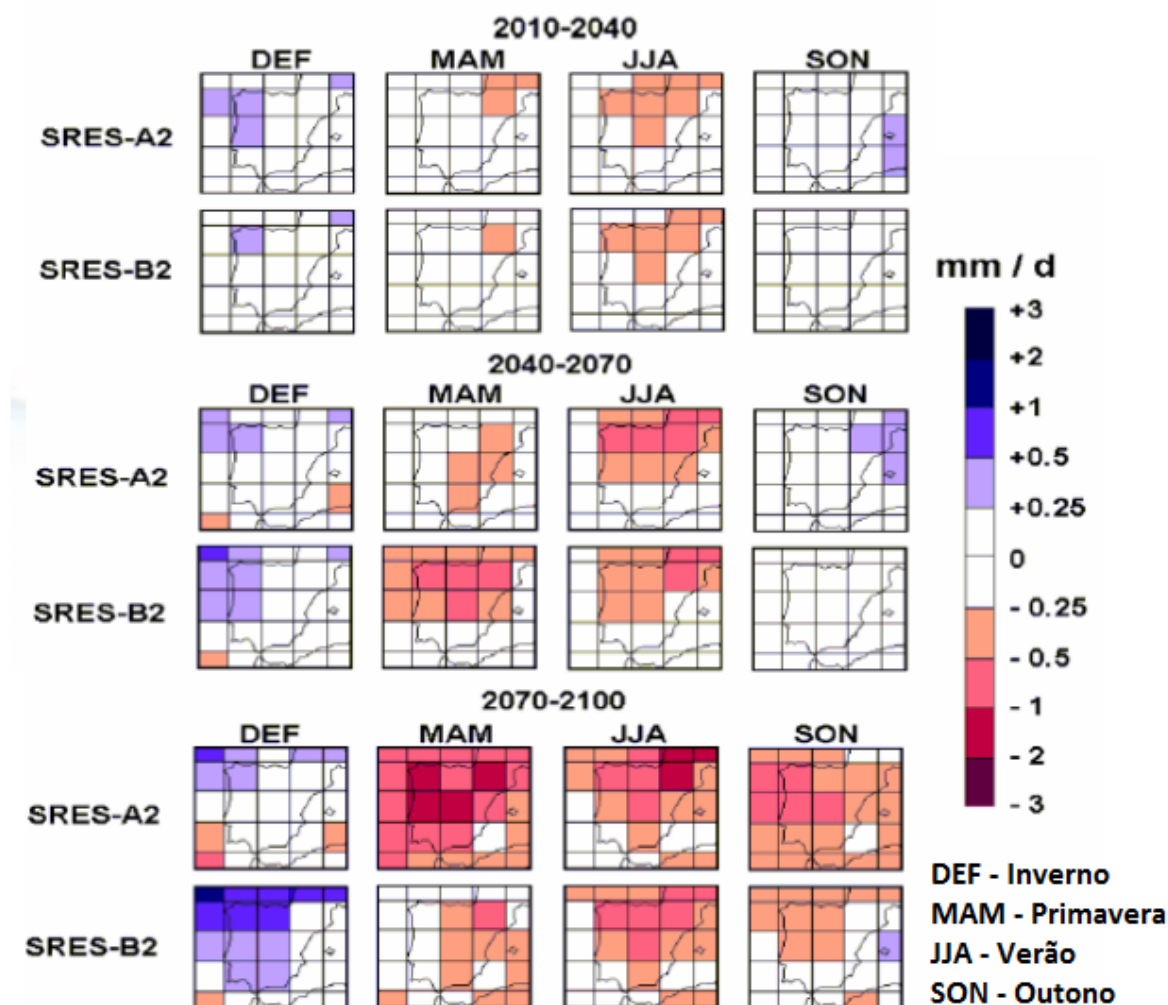


Figura 2.10 – Projeções da mudança da precipitação sazonal para três diferentes períodos do século XXI e para dois diferentes cenários de emissões A2 e B2 (Lope *et al*, 2005).

As mudanças com mais impacto para os sistemas de drenagem urbanos são o aumento da intensidade de precipitação e consequente escoamento (Butler e Davies, 2011). As principais implicações destas mudanças para os sistemas de drenagem são:

- Sobrecarga dos sistemas de drenagem devido ao aumento do volume e velocidade de escoamento.
- Deterioramento devido às constantes sobrecargas dos sistemas.
- Inundações mais frequentes.
- Maior acumulação e transporte de poluentes, em particular, no Verão.

- Agravamento da qualidade da água dos cursos de água naturais devido às descargas em excesso dos sistemas de drenagem.

#### 2.2.4 Estratégia de avaliação das Alterações Climáticas na precipitação

As curvas IDF, curvas que relacionam a intensidade-duração-frequência das chuvadas, constituem elementos básicos para o cálculo do dimensionamento de sistemas de drenagem. É de todo importante estudar o impacto que as alterações climáticas terão sobre estas curvas. (Arnbjerg-Nielsen, 2008)

Ao longo dos últimos anos vários estudos foram realizados no âmbito deste tema. Os sistemas de saneamento em Flanders (Bélgica) foram dimensionados recorrendo a chuvadas de projeto a que correspondem períodos de retorno que vão desde os 2 aos 20 anos. Perante o atual cenário de mudança, a intensidade de precipitação sofreu um acréscimo correspondente a um intervalo que vai de 15% a 50% dependendo do período de retorno associado que está incluído num intervalo de 1 mês a 1 ano. Para um cenário de médias emissões estes aumentos rondam os 4% a 15 %. No caso do cenário de maiores emissões este aumento será superior aos 50%. (Willems *et al*, 2012)

O conceito de fator de mudança climática é fundamental no estudo da variação da intensidade de precipitação devido às alterações climáticas, segundo Arnbjerg-Nielsen (2008), *cf* define-se como a razão entre uma intensidade de precipitação com um período de retorno  $T$  e uma duração  $d$  para um cenário futuro  $I(T, d)_{\text{futuro}}$ , e a correspondente intensidade de precipitação presente  $I(T, d)_{\text{presente}}$ , tal como indica a equação (2).

$$cf = \frac{I(T, d)_{\text{futuro}}}{I(T, d)_{\text{presente}}} \quad (2)$$

Arnbjerg-Nielsen (2012) realizou um estudo no âmbito da variação da intensidade de precipitação para a Dinamarca com base na análise de series históricas. Com este estudo conclui que o fator climático aumenta com o aumento do período de retorno e diminuiu com o aumento da duração da chuvada, conclui igualmente que a influência do tempo de retorno sobre este fator é maior que a duração da chuvada. De acordo com o mesmo autor o fator climático para a Dinamarca varia entre 1,1 e 1,5 para um tempo de retorno que vai desde 2 anos a 100 anos e durações de 10 minutos a 24 horas.

Para um caso de estudo realizado para a cidade de São Paulo (Brasil), Schardong e Simonovic (2013) propuseram uma alteração dos parâmetros que compõe a equação correspondente ao cálculo da intensidade de precipitação para a referida cidade. Esses foram ajustados de acordo com os dados históricos para três diferentes cenários climáticos futuros A2, B1 e B2 sendo ainda considerados dois períodos diferentes os 50s (2046-2065) e os 80s (2081-2100). O

estudo conclui que para todos os cenários e períodos de retorno existe um aumento de precipitação de 4%-20%.

Um estudo de Rodríguez *et al* (2014) com objetivo de avaliar o impacto das alterações climáticas nas curvas IDF para a área metropolitana de Barcelona foi publicado recentemente e foram determinados os fatores de mudança climática para a região através da equação (2). Este estudo demonstra tal como outros uma clara tendência para o aumento dos fenómenos de precipitação extrema no futuro. Para o período de 2066-2099 e sob os cenários A2 e B2 a precipitação extrema diária irá aumentar com uma probabilidade de 95%, sendo que para um período de retorno de 1 ano o aumento da intensidade de precipitação será de 20%, e de 31% para um tempo de retorno de 10 anos (Rodríguez *et al*, 2014).

Um estudo ainda em desenvolvimento idêntico ao estudo de Rodríguez *et al* (2014), mas referente à cidade de Madrid (Espanha) expõe valores de fatores climáticos para essa cidade para chuvadas com durações de 1 hora, 2.15 horas e 24 horas. Em comunicação pessoal com os autores Casas-Castillo e Rodríguez-Solà, constou-se que esses valores (ainda não publicados) para um cenário futuro RCP 8.5 são os apresentados no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Fatores climáticos para a cidade de Madrid (Espanha) para o século XXI (Casas-Castillo e Rodríguez-Solà, 2014).

	24h	1h	2,15 h
Barcelona (A2)	1,01	1,1	
Madrid RCP 8.5	1,06	1,2	1,16

Os valores disponibilizados pelos autores demonstram que a intensidade de precipitação para a cidade de Madrid estará sujeita a um acréscimo que vai desde os 6% para chuvadas com duração de 1 dia até 20% para chuvadas com duração de 1 hora.

O Quadro 2.5 é um resumo dos vários estudos realizados nos últimos anos em que são avaliados o aumento da intensidade de precipitação sob o impacto das alterações climáticas para os diferentes cenários climáticos.

Quadro 2.5 – Quadro resumo da variação do aumento de intensidade de precipitação e precipitação para diferentes zonas e segundo diferentes autores.

Artigo	Tipo de dados	Aumento*	Zona
Simonovic e Schardong (2012)	Precipitação média diária	4%-26% (para todos os cenários e tempos de retorno)	São Paulo (Brasil)
Willems <i>et al</i> (2012)	Intensidade de precipitação	Tr = 10 anos 15% (cenário baixas emissões) 50% (cenário altas emissões)	Flanders (Bélgica)
Butler e Davies (2011)	Intensidade de precipitação	Tr = 2 anos 5% (cenário baixas emissões) 20% (cenário altas emissões)	Inglaterra
Peak <i>et al</i> (2013)	Intensidade de precipitação	Tr = 100 anos 35% (cenário baixas emissões) 42% (cenários altas emissões)	Ontario (Canada)
Rodríguez <i>et al</i> (2014)	Intensidade de precipitação	Tr = 1 ano      20% Tr = 10 anos    31%	Barcelona (Espanha)
Buonomo <i>et al</i> (2007)	Intensidade de precipitação	Tr=20 anos      18% Tr=2anos        13%	Europa
Arnbjerg-Nielsen (2012)	Intensidade de precipitação	Tr=2 anos        10% Tr=100anos      50%	Dinamarca
Casas-Castillo e Rodríguez-Solà (2014).	Intensidade de precipitação	Tr = 20 anos 6% (cenário baixas emissões) 20% (cenário altas emissões)	Madrid (Espanha)

\* Em que Tr é o período de retorno

### 2.3 Modelação Hidrológica/Hidráulica

Um modelo matemático de simulação hidrológico/hidráulica pretende, através de um conjunto de equações matemáticas e de correspondentes métodos de resolução desses sistemas de equações representar uma realidade, o que no caso da drenagem urbana se traduz no comportamento de sistemas de drenagem de águas pluviais (Marques *et al*, 2013). Um modelo hidrológico é uma representação de um sistema numa linguagem simples, com o

objetivo de encontrar respostas para diferentes condições do sistema (Santos, 2009). De acordo com Clemens (2001), um modelo é construído a partir de duas componentes básicas:

- Descrição dos processos hidráulicos do sistema.
- Descrição geométrica do sistema.

Os processos hidráulicos envolvidos podem ser distinguidos em dois grupos: o modelo hidrológico e o modelo hidráulico (Clemens, 2001). De uma maneira geral pode dizer-se que o modelo hidrológico, de acordo com as características de uma dada bacia, quantifica o escoamento superficial através de algoritmos de transformação de precipitação em escoamento, o modelo hidráulico simula o movimento das águas no interior dos coletores de drenagem (Marques *et al*, 2013).

### **2.3.1 Modelos Hidrológicos**

As diferentes características de uma bacia hidrográfica, assim como, o tipo e estado da sua superfície têm influência direta no processo de escoamento. É de todo impossível descrever em detalhe a geometria da superfície de uma determinada área para formulação de um modelo, como tal, adotam-se valores médios de forma a descrevê-la. (Clemens, 2001)

Os processos físicos que compõe o ciclo hidrológico durante uma chuvada como, a precipitação, a interceção, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial, são essenciais para se gerar um modelo hidrológico. Estes processos são representados através de modelos matemáticos. (Santos, 2009)

Nem toda a precipitação é transformada em escoamento para um sistema de drenagem, vários fatores influenciam essa quantidade, tais como, depressões na superfície de captação, perdas iniciais, evaporação e infiltração (Clemens, 2001). A Figura 2.11 mostra os vários processos envolvidos nos modelos de drenagem urbana.

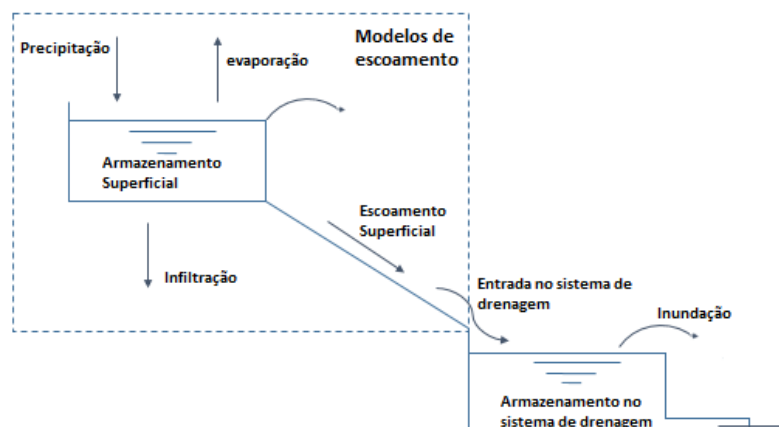


Figura 2.11 – Processos envolvidos nos modelos de drenagem urbana (adaptado de Clemens (2001)).

O armazenamento de água à superfície é influenciado pela inclinação do terreno (Figura 2.12), tipo de solo e/ou pavimento e pelo estado em que esse mesmo terreno se encontra. De acordo com Clemens (2001) citando Kidd (1978) os valores de armazenamento à superfície em relação à inclinação do terreno podem ser expressos pela equação (3).

$$b = 0.77i_t^{-0.49} \quad (3)$$

Onde:

$b$  – Armazenamento à superfície (mm).

$i_t$  – Inclinação do terreno (%).



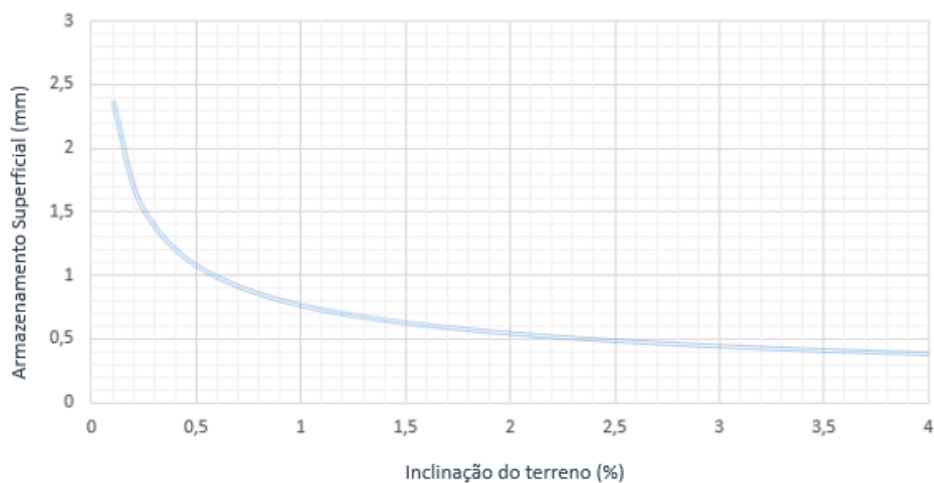


Figura 2.12 – Relação entre armazenamento superficial e inclinação do terreno (adaptado de Clemens (2001)).

A evaporação também é parte fundamental nas perdas iniciais, no entanto, é um processo difícil de quantificar. É impossível quantificar a evaporação para uma dada chuvada (Clemens, 2001). Na prática são feitas aproximações para este valor de acordo com os registos da área em causa (Figura 2.13).

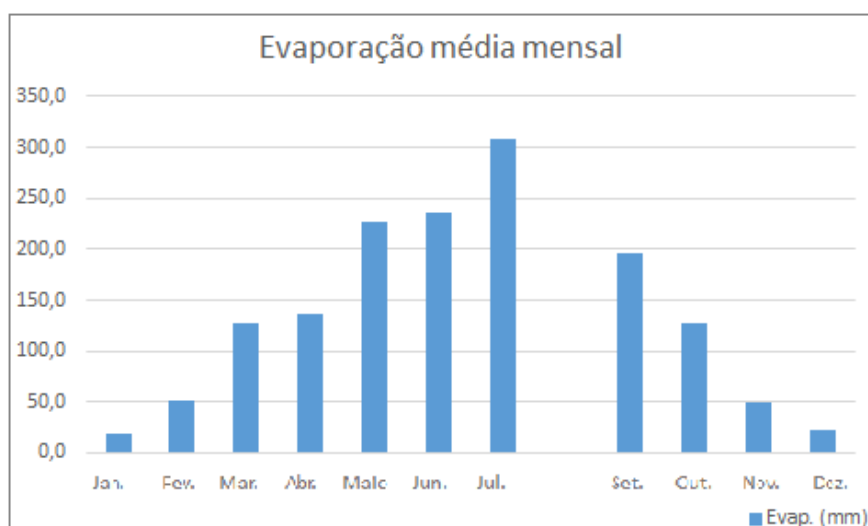


Figura 2.13 – Valores médios mensais de evaporação em Castelo Branco para o ano de 2009 (adaptado de ESACB (2010)).

A quantidade de água que se infiltra no solo depende de dois fatores: características físicas do solo e estado de saturação do mesmo. O Quadro 2.6 apresenta o intervalo de variação para a capacidade de infiltração de acordo com o tipo de pavimento. (Clemens, 2001)

Quadro 2.6 – Intervalo de variação para a capacidade de infiltração (adaptado de Clemens (2001)).

	Valores de infiltração (mm/h)
<b>Pavimento em betão</b>	7-353
<b>Telhas</b>	1-254
<b>Relva</b>	10-500
<b>Solo sem vegetação</b>	10-100

Um modelo muito utilizado para a determinação da infiltração no solo é o modelo sugerido por Lencastre e Franco (2003). Este modelo define um limite para a taxa de infiltração onde são assumidos os valores máximo e mínimo. Estes valores dependem do tipo de solo e do nível do lençol freático. Este modelo é expresso pela equação (4).

$$f_p = f_f + (f_0 - f_f)e^{-kt} \quad (4)$$

$f_p$  - Taxa de infiltração no tempo (cm/h).

$f_f$  - Taxa de infiltração mínima (cm/h).

$f_0$  - Taxa de infiltração inicial (cm/h).

$k$  - Constante característica do solo e do revestimento superficial que descreve o decréscimo da taxa de infiltração (h).

$t$  - Instante de cálculo (h).

De acordo com Clemens (2001) existem vários modelos para o cálculo da precipitação que não se perde inicialmente, por depressões no solo, infiltração ou evapotranspiração. O

momento após o início da chuvada em que começa a existir escoamento superficial ( $t_s$ ) pode ser calculado através da equação (5).

$$\int_{t=0}^{t=t_s} (r(t) - i(t) - e(t))dt = S + W \quad (5)$$

Onde:

$S$  - Armazenamento superficial (mm).

$W$  - Perdas iniciais (mm).

$r(t)$ - Intensidade de precipitação em função do tempo (mm/h).

$i(t)$ - Taxa de infiltração em função do tempo (mm/h).

$e(t)$ - Evaporação em função do tempo (mm/h).

Assim tem-se uma condição: Para  $t > t_s$  ocorre escoamento superficial se  $r(t) > i(t) + e(t)$ , e toma o valor de  $r(t) - i(t) - e(t)$ .

O modelo *Variable Percentage Runnoff* é um modelo mais complexo que o modelo geral, e deve ser aplicado a todas as áreas permeáveis da bacia sendo que para as áreas impermeáveis este modelo considera um coeficiente fixo (Quadro 2.7) que permite estimar o escoamento (Leitão *et al*, 2008).

Quadro 2.7 – Percentagem efetiva e escoamento (modelo *Variable Percentage Runnoff*) (Leitão *et al*, 2008).

	% efectiva de escoamento
pavimentada em meio urbano (superfície comum)	60
Telhados	80
Estradas com boa drenagem	80
Estradas com muito boa drenagem	100

De acordo com Leitão *et al* (2008) para as áreas permeáveis aplica-se a equação (6).

$$R = P \times \frac{API}{S} \quad (6)$$

Onde:

$R$  – escoamento superficial a cada instante.

$P$  – Precipitação em cada instante ( $\text{mm.h}^{-1}$ ).

$API$  - Índice de precipitação do evento (mm).

$S$  – Capacidade de retenção do solo (mm).

Este modelo apresenta algumas vantagens em relação a outros modelos, tais como:

- Cálculo separado do volume de escoamento para áreas permeáveis e impermeáveis.
- Consideração do nível de saturação do solo para o cálculo do volume de escoamento ao longo do tempo.

O modelo do reservatório linear é uma cascata de  $n$  reservatórios lineares idênticos (Figura 2.14), conhecida por *Nash cascade*, em que o caudal escoado em função do tempo é dada pela equação (7) (Clemens, 2001).

$$q(t) = \int_0^t h(t - \tau) p_n(\tau) d\tau \quad (7)$$

A função de transferência é definida de acordo com a equação (8).

$$h(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left[ \frac{t}{k} \right]^{n-1} e^{-\frac{t}{k}}, \text{ para } t \geq 0 \quad (8)$$

Onde:

$k$  – Constante do reservatório ( $\text{mm/h}$ ) $^{1/n}$ .

$n$  – Número de reservatórios.

$t$  – Tempo.

$p(t)$  – Intensidade de precipitação útil ao longo do tempo (mm/h).

$q(t)$  – Descarga de escoamento ao longo do tempo (mm/h).

$\Gamma(n)$  – Gamma em função de  $n$  (se  $n$  é inteiro então  $\Gamma(n) = n!$ ).

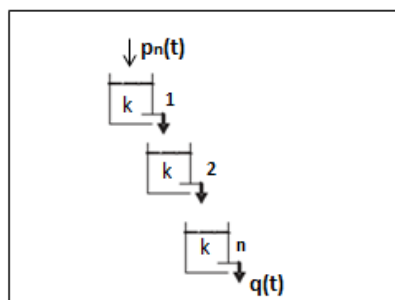


Figura 2.14 – Modelo do reservatório linear (adaptado de Clemens (2001)).

No SWMM o modelo hidrológico utilizado admite cada bacia como um reservatório não linear. As contribuições são provenientes da chuva, degelo e bacias de montante. Como ilustrado pela Figura 2.15.

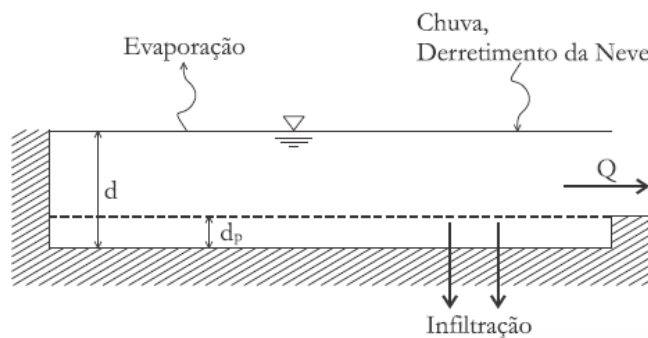


Figura 2.15 – Escoamento no *software* SWMM (EPA, 2012).

No SWMM as bacias são representadas com altura e largura definidos, e divididas em áreas permeáveis e impermeáveis, como se pode ser pela Figura 2.16.

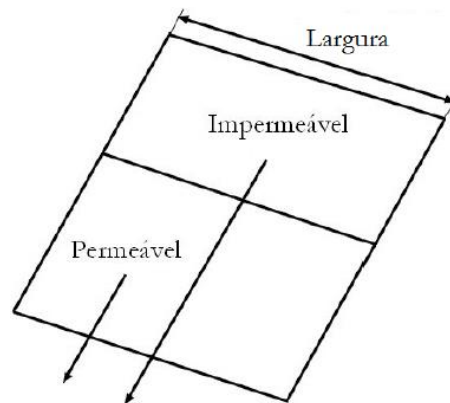


Figura 2.16 - Modelo de sub-bacia utilizado no SWMM (EPA, 2012).

### 2.3.2 Modelos Hidrodinâmicos

A drenagem urbana ocorre numa rede complexa de galerias e canais, com uma grande variação de forma e relevo, interligada com as ruas. O caudal nos sistemas de drenagem varia ao longo do tempo podendo verificar-se mudanças de regime de escoamento e escoamentos sob pressão, devido a fenómenos extremos, como inundações e cheias (Marques *et al*, 2013). Os modelos hidrodinâmicos são utilizados para representar estes diferentes estados do sistema, porém para cada tipo de alteração da rede são necessárias soluções particulares (Neves *et al*, 2001).

As equações matemáticas unidimensionais e bidimensionais que nos permitem descrever o escoamento variável em superfície são as equações de Saint-Venant (Marques *et al*, 2013).

De acordo com Marques *et al* (2013) citando Mendes e Simões (2001) a forma conservativa das equações 1D de Saint-Venant são adequadas para a simulação do escoamento nos coletores e são traduzidas pelas equações (9) que representa a conservação da massa e a equação (10) que representa a quantidade de movimento.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \quad (9)$$

$$\underbrace{\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}}_{\text{aceleração local}} + \underbrace{\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right)}_{\text{aceleração convectiva}} + \underbrace{g \frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{pressão}} = g \left( \underbrace{S_0}_{\text{declive do canal}} - \underbrace{S_f}_{\text{função de atrito}} \right) \quad (10)$$

Em que:

$Q$  – Caudal.

$t$  – Tempo.

$x$  – Direção do escoamento.

$h$  – Altura de água.

$G$  – Aceleração da gravidade.

$S_0$  – Declive do canal.

$S_f$  – Função do atrito.

Para diferentes situações poderão ser adotadas simplificações das equações de Saint-Venant como as que são indicadas no Quadro 2.8 (Butler e Davies, 2011).

Quadro 2.8 – Simplificações das equações de Saint-Venant.

Identificação da equação simplificada	Principais pressupostos
Onda Dinâmica	Sem pressupostos adicionais.
Onda Gravítica	Valor do atrito é pequeno comparado com os termos de gravidade e inércia.
Onda Difusa	Termo da inércia é pequeno comparado com os termos de gravidade e atrito.
Onda Cinemática	Termo da inércia é pequeno comparado com os termos de gravidade, atrito e pressão.

### 2.3.2.1 Modelação de sistemas em carga

Em situações de grandes chuvadas o sistema de drenagem pode entrar em carga quando é ultrapassado o nível de água máximo atingido pelo coletor passando o escoamento a ocorrer sob pressão. Para aplicação das equações de Saint-Venant a condutas sob pressão aplica-se então o conceito de “fenda de Preissmann”. (Marques *et al*, 2013)

O conceito de fenda de Preissmann baseia-se na introdução de uma fenda fictícia (Figura 2.17) na parte superior do coletor para permitir que a altura de escoamento exceda o seu diâmetro assegurando cálculos estáveis sem afetar significativamente a precisão. Esta aproximação permite a utilização das equações de Saint-Venant para o escoamento em pressão (Butler e Davies, 2011).

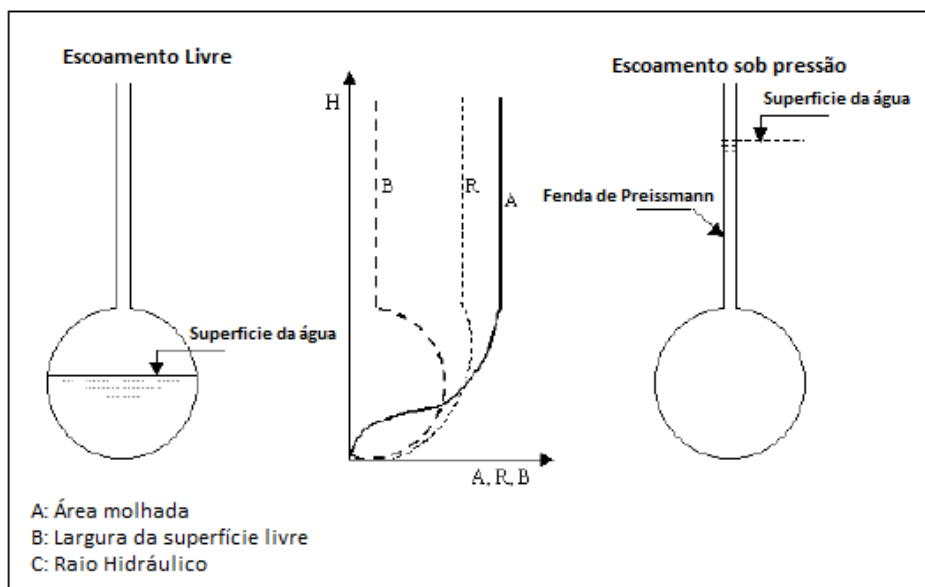


Figura 2.17 – Fenda de Preissmann (Neves *et al*, 2001).

Quando é ultrapassada a capacidade dos coletores e a água chega à superfície, três diferentes abordagens podem ser consideradas, de acordo com Marques *et al* (2013), tal como se descreve na Figura 2.18.

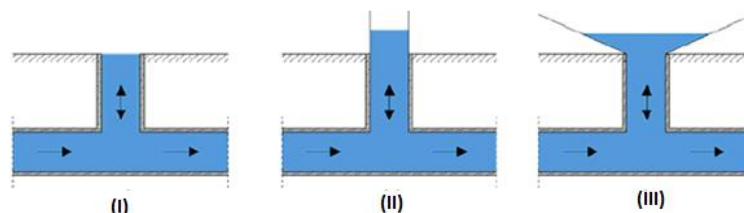


Figura 2.18 – Diferentes abordagens para um sistema em carga: (I) Perda de volume de água que atinge a superfície. (II) Aumento ilimitado da altura de água. (III) Adoção do modelo do



reservatório (água é armazenada durante um período de tempo e regressa à rede quando existir novamente capacidade de escoamento nos coletores) (Marques *et al*, 2013).

### 2.3.2.2 Drenagem Dual

A realidade de interação entre o escoamento nos coletores e a superfície não é corretamente representada pelo esquema da Figura 2.18. A necessidade de se prever com maior exatidão as cheias e inundações implica o conceito de drenagem dual (Marques *et al*, 2013).

A drenagem dual permite a interação entre as duas componentes distintas do sistema de drenagem pluvial: a superfície composta por ruas, canais, depressões e zonas de acumulação (sistema “major”); e a rede de coletores (sistema “minor”) (Marques *et al*, 2013). Nestas condições é possível uma abordagem mais realista das cheias e inundações em meio urbano. A Figura 2.19 mostra uma representação esquemática deste conceito.

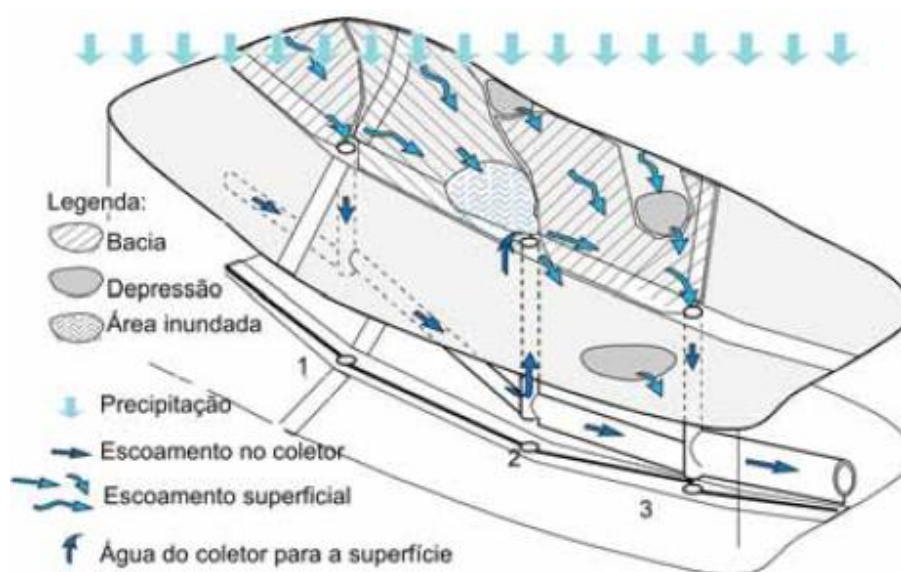


Figura 2.19 – Drenagem Dual (adaptado de Djordjevic *et al* (1999)).

Os modelos de drenagem urbana incluem duas abordagens distintas para a representação da superfície. A rede de coletores (sistema “minor”) é representada em ambas por um modelo unidimensional (1D/1D) (Marques *et al*, 2013). A diferença está na representação da superfície (sistema “major”) que pode ser feita através de um modelo unidimensional (1D/1D) ou através de um modelo bidimensional (1D/2D) (Marques *et al*, 2013). No caso do modelo

(1D/1D) é feita inicialmente uma pré-identificação dos canais, e zonas de acumulação recorrendo a modelos digitais do terreno (MDT), que estão ligados ao sistema de coletores formando um conjunto de canais e nós ligados a esse mesmo sistema (Leitão *et al*, 2008).

Os modelos bidimensionais (1D/2D) não requerem uma pré-identificação dos elementos à superfície. Neste modelo a representação do terreno à superfície é feita por uma malha, em que a cada célula (ponto da malha) está associada informação do terreno, como por exemplo, altitude e coeficiente de rugosidade. O método de cálculo deste modelo consiste no uso das equações de Saint-Venant: solução dinâmica ou uma das simplificações (onda cinemática ou difusa); a cada uma das células constituintes da malha para se obter resultados de caudal, altura de água e velocidade de escoamento. A principal vantagem deste modelo é a visualização do escoamento à superfície. (Leitão *et al*, 2008)

### 2.3.2.3 Software para simulação de sistemas de drenagem - SWMM

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um *software* desenvolvido pela *Environment Protection Agency* (EPA) criado em 1971, que permite fazer a simulação dinâmica de sistemas de drenagem (EPA, 2012).

Este *software* permite a simulação de um único evento chuvoso, como também permite uma simulação contínua a longo prazo. A componente relativa ao escoamento superficial é composta no SWMM por um conjunto de sub-bacias hidrográficas que recebem precipitações e geram escoamentos e cargas poluidoras. O transporte hidráulico é simulado através de um sistema composto por tubos, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas hidráulicas e dispositivos e regulação. Durante o período de simulação o SWMM acompanha a quantidade e qualidade de escoamento dentro de cada sub-bacia, assim como, o caudal, a altura de água e a qualidade da água em cada conduta. (EPA, 2012)

As aplicações mais usadas no SWMM de acordo com EPA (2012) são entre muitas outras:

- Conceção e dimensionamento de componentes da rede de drenagem.
- Dimensionamento de estruturas e acessórios para controlo de cheias e inundações.
- Conceção de estratégias de controlo para minimizar o extravasamento de sistemas unitários e mistos.

Este *software* permite ao utilizador escolher entre três modelos para a simulação do escoamento: regime permanente, onda cinemática e onda dinâmica. (EPA, 2012)

O modelo de regime uniforme representa a forma mais simples de transporte da realidade, para cada intervalo de tempo o escoamento é uniforme e permanente.

O modelo cinemático resolve a equação da continuidade juntamente com uma forma simplificada da equação da quantidade de movimento, em cada conduta. Este modelo não tem

em consideração as curvas de regolfo, pelo que apenas pode ser utilizado para condutas com inclinações positivas.

O modelo dinâmico é o único que resolve as equações completas unidimensionais de Saint-Venant, logo é aquele que gera resultados mais precisos. Este modelo fornece ao utilizador o nível de água nos nós e no escoamento ao longo das condutas e pode ser utilizado em qualquer tipo de rede.

## **2.4 Gestão das águas pluviais**

O crescente aumento da população mundial, com conseqüente aumento das áreas urbanas e áreas impermeáveis, e o impacto das alterações climáticas, onde são esperados um aumento da intensidade e frequência de fenómenos de precipitação extremos, gera uma forte necessidade ao uso de alternativas aos sistemas de drenagem clássicos (Butler e Davies, 2011).

A partir da década de 60, questionou-se a drenagem urbana clássica, que por intermédio de obras destinadas a retirar o mais rápido possível as águas em excesso de locais importantes, transferem o problema para outras áreas ou para o futuro. Recentemente, tem sido estudada a redução de caudais a partir do seu armazenamento temporário e distribuído pelas áreas urbanas. (Pompêo, 2000)

### **2.4.1 Implicações das alterações climáticas na gestão de águas pluviais**

Um aumento na intensidade e frequência dos fenómenos de precipitação devido às mudanças climáticas é esperado (Willems *et al*, 2012). Na drenagem urbana, os impactos socioeconómicos e os custos resultantes serão significativos e requerem estratégias de adaptação para redução do risco e para que o nível de serviço das infraestruturas possa ser mantido no futuro (Mailhot e Duchesne, 2010).

Diferentes cenários possíveis foram desenhados, para um cenário de altas emissões será necessário um armazenamento adicional até 30% para limitar a frequência de cheias. A adoção temporal de medidas que combatam esta mudança não é certa devido à grande incerteza do fenómeno das alterações climáticas, no entanto, a sua solução depende de vários fatores incluindo a severidade do impacto, conseqüências ambientais, impactos socioeconómicos e risco para a saúde pública. (Willems *et al*, 2012)

Países como a Suécia e a Dinamarca já determinaram os custos destas mudanças. Na Dinamarca, por exemplo, se os sistemas de drenagem fossem neste momento atualizados para cumprir com a precipitação prevista para um cenário de emissão A2 então a Dinamarca teria um investimento anual nos sistemas de saneamento na ordem dos 20% dos custos de manutenção anuais. A Figura 2.20 mostra como a frequência de cheias e o conseqüente dano

nos sistemas de drenagem serão aumentados para a cidade em relação ao período de retorno. (Willems *et al*, 2012)

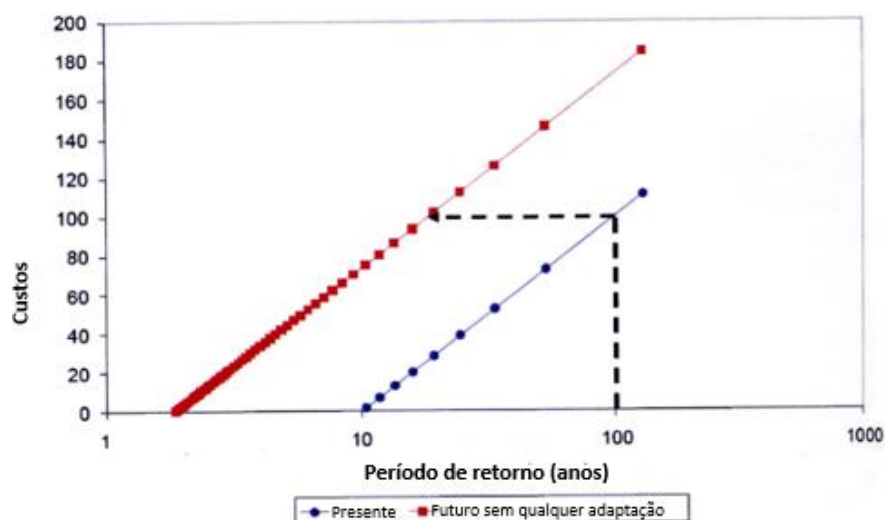


Figura 2.20 – Alteração no custo de extravasamento dos sistemas de drenagem para a cidade de Roskilde na Dinamarca quando a chuva de projeto tem um aumento de 40% (adaptado de Willems *et al* (2012)).

A cidade de Roskilde na Dinamarca tem um encargo anual de manutenção e reabilitação dos sistemas de saneamento urbanos de 2 milhões de euros. Este valor irá sofrer um aumento de 0.2 milhões de euros por ano devido ao aumento gradual de extensão previsto para os sistemas de saneamento. Ainda de acordo com o mesmo autor, quando as intensidades das chuvas aumentarem 40%, o custo anual será de 6.7 milhões de euros. (Butler e Davies, 2011)

#### 2.4.2 Sistemas de Drenagem Urbanas Sustentáveis (SUDS)

Os objetivos dos SUDS são minimizar os impactos causados pelo desenvolvimento urbano na quantidade e qualidade do escoamento superficial, assim como, maximizar o bem-estar das populações e a biodiversidade (Woods-Ballard *et al*, 2007).

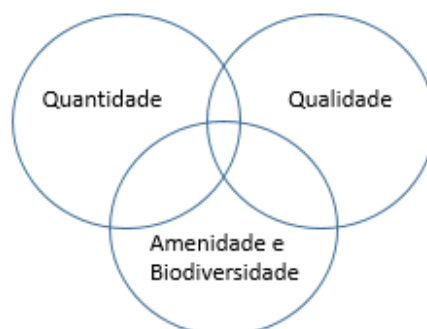


Figura 2.21 – Objetivos dos SUDS (Adaptado de Woods-Ballard *et al* (2007)).

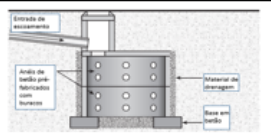
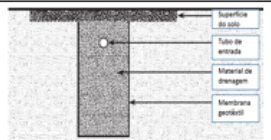
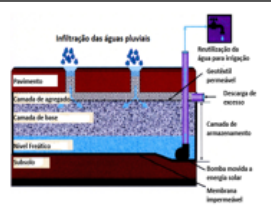
Os SUDS são dispositivos de controlo do escoamento superficial das águas pluviais e devem ser integrados no ambiente urbano de uma forma discreta e de forma a melhorar o ambiente urbano. O escoamento pode ser gerido de diversas formas. Uma forma de deter parte da precipitação antes que esta atinga o solo é através de dispositivos de controlo de origem, de acordo com (Quadro 2.9). (Butler e Davies, 2011)

Quadro 2.9 – SDUS: Dispositivos de controlo de origem.





Dispositivos de controlo de origem	<p><b>Coberturas Ajardinadas (Green roofs)</b> têm um potencial de armazenamento bastante positivo, e benefícios evidentes na melhoria da qualidade das águas pluviais, assim como, incitam à evapotranspiração. Fotografia extraída de EPA@ (2014).</p>	
	<p><b>Armazenamento conectado a tubos de queda (Storage connected to downpipes)</b> dispositivos que armazenam a água junto aos tubos de queda. Estes dispositivos poderão ter uma capacidade de armazenamento de 350 l. É um meio interessante para colheita de água para usos de jardinagem, assim como, para usos domésticos como autoclismos sanitários. Imagem extraída de CO@ (2014).</p>	

Nos Quadro 2.10 e Quadro 2.11 apresentam-se alguns exemplos de dispositivos de infiltração e retenção de águas pluviais, respetivamente.

Quadro 2.10 – SDUS: Dispositivos de infiltração.

Dispositivos de infiltração	<p><b>Soakway</b> são dispositivos que se encontram abaixo da superfície para onde é conduzido o escoamento superficial e de seguida infiltrado. Estes dispositivos devem exigir uma distância de pelo menos 1 m entre a base do dispositivo e o nível freático do solo, de forma a serem eficientes durante períodos de chuva e a não contaminarem as águas subterrâneas (Willems <i>et al</i>, 2012). Figura adaptada de Butler e Davies (2011).</p>	
	<p><b>Trincheiras de infiltração</b> são dispositivos preenchidos com material granular permeável e têm por objetivo conduzir a infiltração da água à superfície para o solo (Woods-Ballard <i>et al</i>, 2007). De acordo com Butler e Davies (2011) as trincheiras de infiltração projetadas para beiras de estrada têm uma eficiência de remoção média anual para sólidos em suspensão, metais e óleo de 60 a 85%. Figura adaptada de Butler e Davies (2011).</p>	
	<p>Os <b>pavimentos permeáveis</b> permitem a infiltração das águas pluviais através da superfície onde é armazenada, e posteriormente reutilizada ou infiltrada no solo. Os blocos que constituem o pavimento podem ser porosos de maneira a que a água se infiltre através deles, ou simplesmente estarem dispostos de maneira a que a água passe através deles (Butler e Davies, 2011). As taxas de infiltração através de pavimento permeáveis podem ser de 1000 mm/h ou mais elevadas dependendo do tipo de pavimento (Butler e Davies, 2011). Estes pavimentos requerem manutenção e demonstram excelente desempenho na retenção e degradação de óleos. Figura adaptada de Woods-Ballard <i>et al</i> (2007).</p>	

Quadro 2.11 – SDUS: Dispositivos de retenção.

Dispositivos de retenção	<p><b>Pântanos artificiais</b> são superfícies inundadas permanentemente que fornecem um armazenamento temporário para um escoamento adicional. Possuem grandes benefícios para animais e plantas. Figura extraída de Woods-Ballard <i>et al</i> (2007).</p>	
	<p><b>Bacias de detenção</b> são usadas para deter o escoamento (volume) durante um determinado período de tempo, normalmente curto. Estas bacias são projetadas para que após terminada a chuvada de projeto fiquem secas (Woods-Ballard <i>et al</i>, 2007). Figura extraída SC@ (2014).</p>	
	<p><b>Bacias de detenção extensas</b> são dispositivos que visam a retenção do escoamento durante um período de tempo específico, normalmente 24h. Figura extraída de Woods-Ballard <i>et al</i> (2007).</p>	
	<p>As <b>bacias de retenção</b> são dispositivos de controlo de escoamento e são projetadas para se encontrarem permanentemente com água. Contêm também capacidade de tratamento de água. Figura extraída de Matias (2006).</p>	

#### 2.4.2.1 Bacias de retenção/detenção

As bacias de retenção são projetadas para que estejam permanentemente com água (pântanos e lagoas), e são usadas para controlo de excesso de escoamento (Figura 2.22) e tratamento da qualidade da água (Woods-Ballard *et al*, 2007). Em geral a finalidade de uma bacia de retenção é de natureza predominantemente hidráulica, isto é, destinam-se a armazenar

temporariamente um determinado volume de água para efeitos de regularização do caudal, com vista ao amortecimento do caudal de ponta para jusante (Matias, 2006).

As principais funções de uma bacia de retenção/detenção, de acordo com Lima *et al* (2006) são:

- Reduzir o caudal de ponta de cheia provocado pelo impacto da urbanização e das alterações climáticas.
- Evitar a degradação (inundação e erosão) do meio recetor a jusante.
- Constituir reservas importantes para incêndios e rega.
- Contribuir para o melhoramento das águas pluviais.
- No caso de terem água de forma permanente possuem grandes capacidades ambientais e ecológicas.

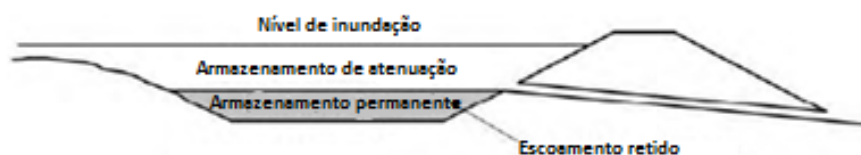


Figura 2.22 – Esquema de bacia de retenção (Woods-Ballard *et al*, 2007).

Os elementos constituintes das bacias de retenção superficial, de acordo com o artigo 178.º do RGSPDADA são:

- Corpo da bacia (inclui fundo e bermas).
- Dispositivos de regularização do caudal efluente e a manutenção de um nível mínimo a montante, no caso de bacias de água permanente.
- Descarregadores de superfície, e eventualmente diques fusíveis.
- Descarregadores de fundo.

Os tipos de bacias existentes podem classificar-se quanto à sua implementação como: Bacias a céu aberto, a seco ou com nível de água permanente; e Bacias enterradas (Matias, 2006).



Figura 2.23 – Exemplos de bacias de retenção: a) Bacia seca do Chemim de Clères, França; b) Bacia com água permanente de Marne-la-Vallée, França. (Matias, 2006).



Figura 2.24 – Exemplo de bacia enterrada: Cisterna de Magazão (I.G.P.A.A., 2004).

Quanto à sua localização relativamente ao coletor principal da rede de drenagem podem classificar-se como: Bacias em série (on-line); Bacias em paralelo (off-line) (Matias, 2006).

Uma bacia de retenção off-line é um dispositivo de armazenamento para onde é desviado o caudal em excesso da rede de drenagem. A vantagem deste dispositivo é o facto de o volume de armazenamento ser menor que o armazenamento on-line devido a somente parte desse volume cruzar esta bacia. (Lima *et al*, 2006)



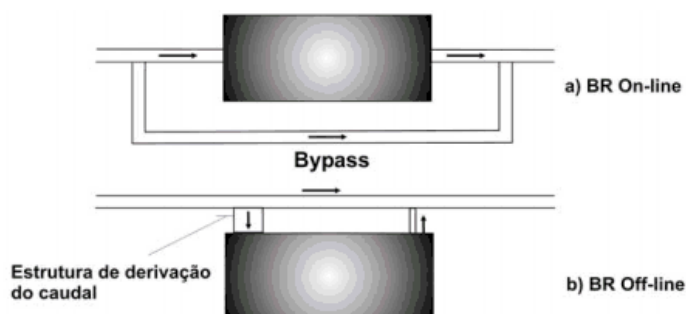


Figura 2.25 – Bacia de retenção: a) On-Line; b) Off-Line (Lima *et al*, 2006).

O volume de armazenamento de uma bacia de retenção pode ser calculado pelo *Método Holandês*. Este é um método simplificado que pode ser adotado para qualquer dispositivo de controlo que apresente um determinado volume de armazenamento, e baseia-se no conhecimento das curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) para a zona em estudo. Este método permite calcular o volume necessário para armazenar o caudal afluyente resultante da precipitação crítica para um dado período de retorno, para garantir um caudal constante correspondente à máxima capacidade de vazão da estrutura a jusante. O volume de armazenamento pode ser obtido pela equação (11). (Matias, 2006).

Os critérios de pré-dimensionamento para uma bacia de retenção são descritos no Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais (RGSPDADAR – Decreto regulamentar N°23/95 de 23 de Agosto). Salienta-se que no regulamento não existe a multiplicação de  $q_s$  por 60, no entanto, após o estudo desta equação noutros trabalhos, como Matias (2006) executou-se a devida correção.

$$V = 10 \cdot \left[ -\frac{b - q_s}{(1 + b)} \right] \cdot \left[ \frac{60 \cdot q_s}{a \cdot (1 + b)} \right]^{\frac{1}{b}} \cdot C.A \quad (11)$$

$$q_s = \frac{6 \cdot q}{C.A} \quad (12)$$

$V$  – Volume de armazenamento, em metros cúbicos.

$q_s$  – Caudal específico efluente, ou seja, o caudal por unidade de área ativa da bacia de drenagem, em milímetros/minuto.

$C$  – Coeficiente de escoamento.

$a, b$  – Parâmetros da Curva de Intensidade-Duração-Frequência.

$q$  – Caudal máximo efluente, em metros cúbico/segundo.

$A$  – Área da bacia de drenagem, em hectares.

#### 2.4.2.2 Aplicações dos SUDS

Os SUDS nas suas mais diversas formas devem ser usados em conjunto. Cada diferente dispositivo representa diferentes estágios da gestão das águas pluviais por via destes sistemas. O conjunto de medidas (Figura 2.26) que de uma forma sequencial compõe a gestão de águas pluviais por via dos SUDS é chamada de *management train*. (Butler e Davies, 2011)

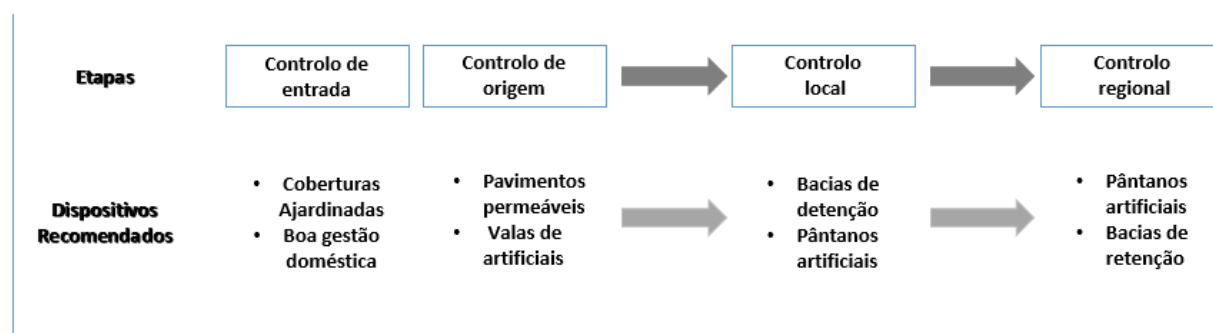


Figura 2.26 – Sequência de gestão de SUDS (adaptado de Butler e Davies (2011)).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Estudo de Caso

A zona de estudo localiza-se em Coimbra (Portugal) e tem uma área total de aproximadamente 1.5 km<sup>2</sup>. A bacia apresenta uma grande variabilidade morfológica, sendo constituída por três zonas distintas: a “Baixa” com 0,4 km<sup>2</sup> é uma zona maioritariamente ocupada por comércio e serviços; a “Alta” com 0,2 km<sup>2</sup> é uma zona bastante acentuada e altamente urbanizada; a restante área é igualmente bastante urbanizada e tem aproximadamente 0,9 km<sup>2</sup> (Simões *et al*, 2010). Na Figura 3.1 apresenta-se a vista aérea da zona de estudo.



Figura 3.1 – Vista aérea da zona de estudo. A Praça da República assinalada a vermelho e a Praça 8 de Maio a amarelo. (SM@, 2014)

Esta é uma zona bastante urbanizada e vulnerável a cheias urbanas, em particular na zona da Praça 8 de Maio onde recentemente sofreu inundações (por exemplo, 2006/09/06, 25/10/2006, 21/09/2008 e 24/12/2013). As inundações existentes nesta bacia hidrográfica devem-se sobretudo à capacidade limitada de entrada das águas pluviais no sistema de coletores. Na Figura 3.2 apresenta-se o modelo digital do terreno da zona de estudo assim como um dos locais mais afetados por inundações. (Simões *et al*, 2010)



Figura 3.2 – Zona de estudo (Simões *et al*, 2010).

O sistema de drenagem da zona tem 34,8 km de comprimento e apresenta várias zonas de possível acumulação de água (Figura 3.3) (Marques *et al*, 2013). O tempo de concentração da bacia é segundo Simões *et al* (2010) de 45 minutos.



Figura 3.3 – Rede de drenagem superficial (Simões *et al*, 2010).

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Introdução

O trabalho consiste na avaliação do impacto das mudanças climáticas na zona apresentada anteriormente, tendo em conta o ajuste das curvas IDF portuguesas para o presente cenário de alterações climáticas. De acordo com as atuais curvas IDF para Portugal, neste caso para Coimbra, e tendo como base os estudos realizados neste âmbito, as curvas IDF atuais serão adaptadas para diferentes cenários de emissões.

### 3.2.2 Precipitação

Em relação à precipitação foi necessário recorrer a chuvadas com o tempo de retorno 100 anos. O cálculo das intensidades de precipitação foi efetuado pelo método dos blocos alternados (Chow *et al*, 1988) com base nas curvas IDF para a zona de estudo. De acordo com Portela *et al* (2000) uma chuvada com duração tripla do tempo de concentração ( $tc$ ) conduz a um caudal de cheia superior ao caudal para a duração de precipitação do  $tc$ , assim, tendo em conta este estudo, a duração utilizada para cada chuvada foi de três vezes o  $tc$  da bacia, ou seja, 135 minutos.

### 3.2.3 Rede de drenagem dual

Para este trabalho recorre-se a um modelo de drenagem dual 1D/1D em SWMM. A adaptação da rede é um processo moroso e por vezes bastante complexo que envolve a moldagem da rede no *software* SWMM. Recorreu-se à rede previamente moldada por Machado (2013) e Paula (2013) fazendo-se os ajustes necessários.

A modelação da rede 1D/1D será feita no *software* SWMM para as curvas IDF normais e alteradas, para ambas as adaptações das curvas IDF apresentadas e para os diferentes cenários. Feita a análise serão implementadas bacias de retenção na rede recorrendo às ferramentas ao mesmo *software*.

### 3.2.4 Adaptação das Curvas IDF às Alterações Climáticas

A adaptação das curvas IDF portuguesas às alterações climáticas é fundamental. É necessário construir descrições plausíveis e necessariamente simplificadas de modo a quantificar os impactos das alterações climáticas no dimensionamento de sistemas de drenagem.

Neste trabalho a adaptação das curvas IDF será feita para dois cenários futuros, baseados nas previsões do IPCC para Portugal para um aumento de 10% (Adaptação 1), 20% (Adaptação 2) e para o cenário RCP8.5 que representa um cenário de altas emissões um pouco mais extremo que A2 (Adaptação 3).

#### 3.2.4.1 Adaptação 1 – IPCC-10%

A adaptação 1 tem por base as previsões apresentadas pelo 5º relatório do IPCC em que se atribuiu uma percentagem de aumento da 10% às intensidades de precipitação atuais. Obtiveram-se pelo método dos blocos alternados as chuvadas de projeto para um tempo de retorno de 100 anos. Na Figura 3.4 pode observar-se os valores de intensidade para a adaptação 1.

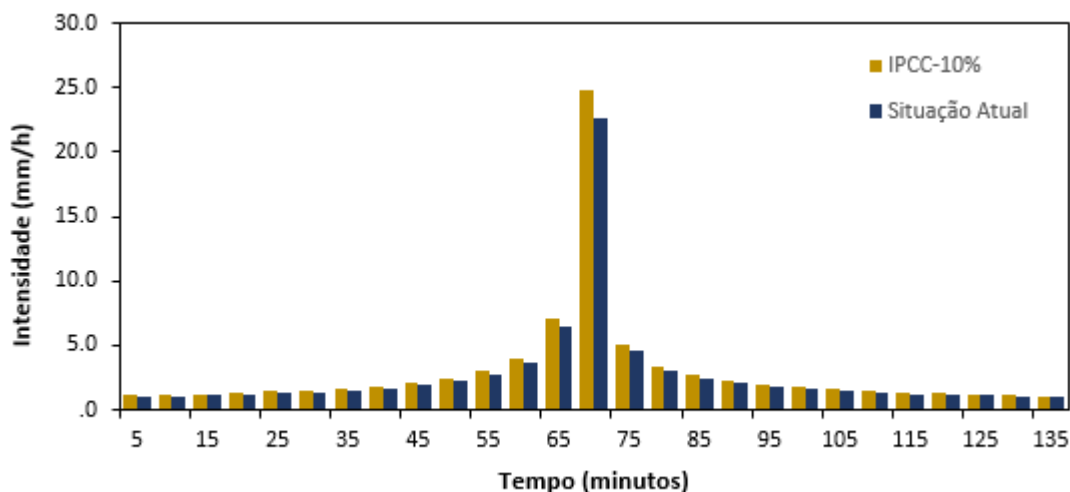


Figura 3.4 – Método dos blocos alternados para a adaptação 1 e para  $Tr = 100$  anos.

### 3.2.4.2 Adaptação 2 – IPCC-20%

A adaptação 2 tem por base as previsões apresentadas pelo 5º relatório do IPCC em que se atribuiu uma percentagem de aumento de 20% às intensidades de precipitação para um tempo de retorno de 100 anos. Através do método dos blocos alternados obtiveram-se as chuvadas de projeto. Na Figura 3.5 pode observar-se os valores de intensidade para a adaptação 2.

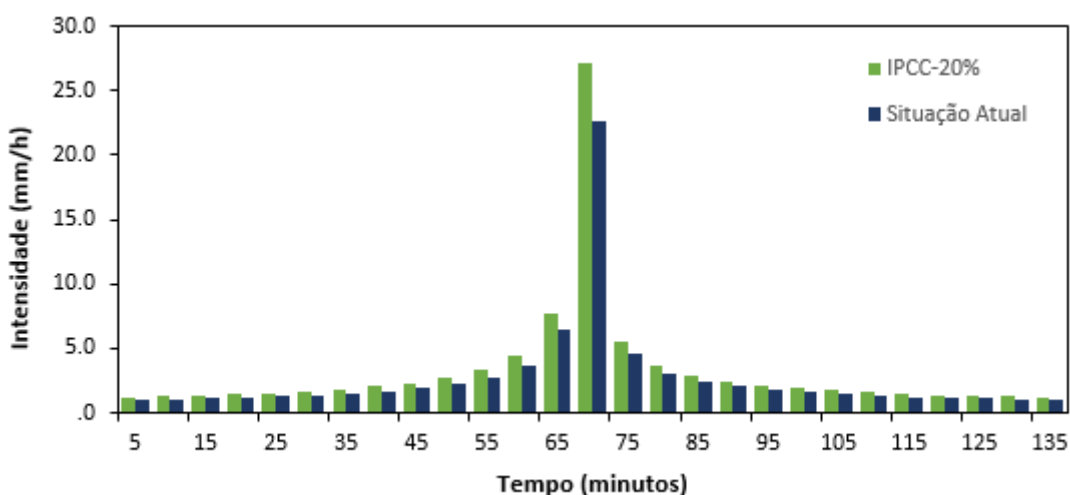


Figura 3.5 - Método dos blocos alternados para a adaptação 2 e para  $Tr = 100$  anos.

### 3.2.4.3 Adaptação 3 – RCP 8.5

O estudo de Rodríguez *et al* (2014), apresentado no subcapítulo 2.2.4 referente à cidade de Madrid (Espanha) expõe valores de fatores climáticos para essa cidade referentes ao século XXI.

De acordo com Casas-Castillo e Rodríguez-Solà (2014) os fatores para a cidade de Madrid serão mais semelhantes aos de Coimbra, pois apesar de Coimbra e Barcelona pertencerem à zona do Mediterrâneo, a influência atlântica é muito importante para Coimbra. Os autores recomendam então para o caso de Coimbra os fatores de Madrid para o cenário RCP 8.5 (um pouco mais extremo que o A2) e durações de chuvadas de 135 minutos.

De forma a melhor entender esta semelhança entre as curvas IDF de Madrid e Coimbra procedeu-se à comparação direta de curvas para ambas as cidades. Segundo as curvas apresentadas por Muñoz *et al* (2004) chega-se aos resultados apresentados na Figura 3.6 e conclui-se que a diferença de intensidade de precipitação entre as cidades de Coimbra e Madrid é aproximadamente 10%.

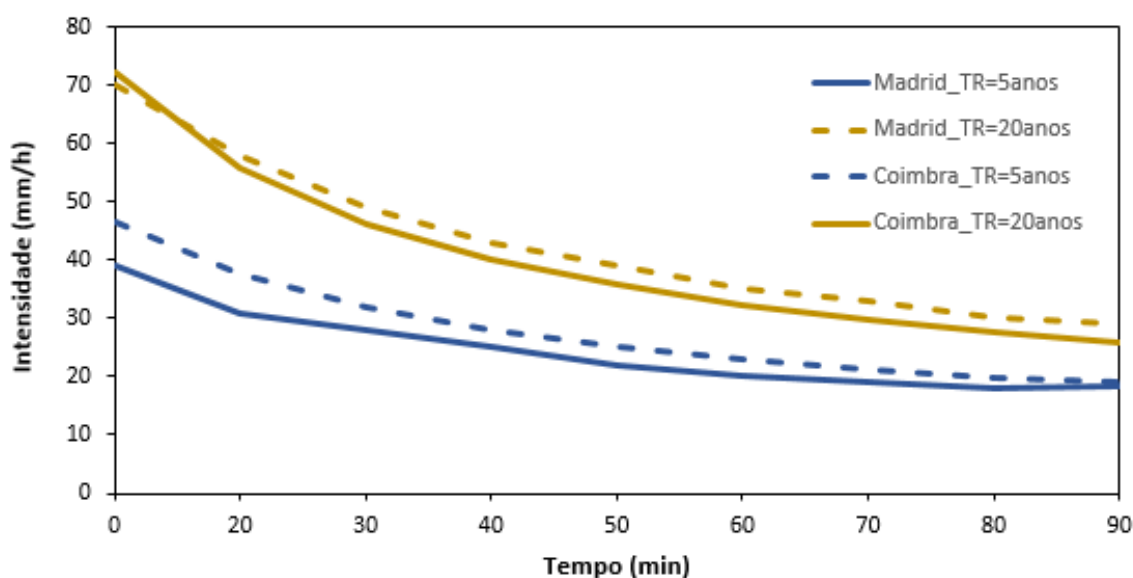


Figura 3.6 – Intensidade de precipitação para as cidades de Coimbra e Madrid.

Assim, a adaptação 3 tem por base a metodologia proposta por Rodríguez *et al* (2014) e os fatores climáticos fornecidos por Casas-Castillo e Rodríguez-Solà (2014) para a cidade de Madrid para durações de 135 minutos. Fazendo uso da equação (2) e dos parâmetros do Quadro 2.4 determinaram-se pelo método dos blocos alterados as intensidade de precipitação



para o cenário climático RCP 8.5. Na Figura 3.7 pode observar-se os valores de intensidade para um tempo de retorno de 100 anos para a adaptação 3.

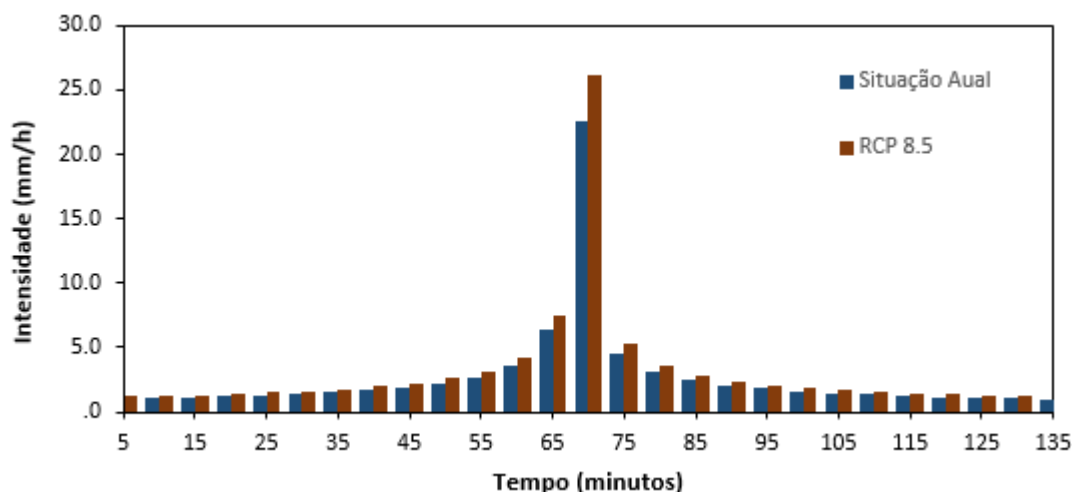


Figura 3.7 – Método dos blocos alternados para a adaptação 3 e para  $Tr = 100$  anos.

### 3.2.5 Implementação de bacias de retenção

Neste trabalho a minimização dos impactos das alterações climáticas passa pela implementação de bacias de retenção. Depois das simulações efetuadas para as curvas IDF normais e alteradas serão estudados os locais para implementação das bacias e feitas as respetivas simulações hidráulicas. Nesta dissertação apenas se considera o aspeto quantitativo da retenção e/ou redução do escoamento superficial, sem abordar a questão da qualidade da água.

A implementação de bacias de retenção pode ser um passo para a solução do problema das cheias urbanas, seja pela possibilidade de projetar atuações distribuídas sobre toda a bacia urbanizada, seja pela possibilidade de otimização de recursos pelo poder público, com uso de obras com múltiplas finalidades.

O dimensionamento destes dispositivos pode ser baseado em fórmulas expeditas (pré-dimensionamento) ou em métodos numéricos (Matias, 2006). Para este trabalho será usada a equação (11) para um pré-dimensionamento inicial.

### 3.2.6 Quantificação do custo das bacias de retenção

O custo de construção de bacias depende de múltiplos fatores, tais como, localização da bacia, mão-de-obra a utilizar, morfologia do terreno, material necessário, dimensão da bacia, entre outros. Devido a esta não linearidade do custo de construção optou-se de grosso modo a

reduzir o custo de construção das bacias ao preço de dois fatores: Preço do betão e escavação por  $m^3$ .

Em contacto com uma empresa especializada nesta área obteve-se o custo de algumas das atividades necessárias à construção da bacia por  $m^3$ , para que se pudesse chegar a um valor o mais exato possível da construção de uma bacia na cidade de Coimbra. O preço de algumas das atividades que compõe a construção de uma bacia de retenção apresentam-se no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Custo de construção de bacias.

	Preço por $m^3$ (€)
Betão colocado em obra	71,7
Mão-de-obra	14,5
Bombagem de betão	8
Escavação	5
Transporte a vazadouro	4

O volume de betão necessário para uma bacia quantifica-se em função das suas dimensões. Supondo uma bacia com base quadrada e uma espessura de parede de 25 cm, com alturas de 2, 3 e 4 metros, os volumes de betão necessários calcularam-se somando a espessura das paredes e apresentam-se na Figura 3.8.

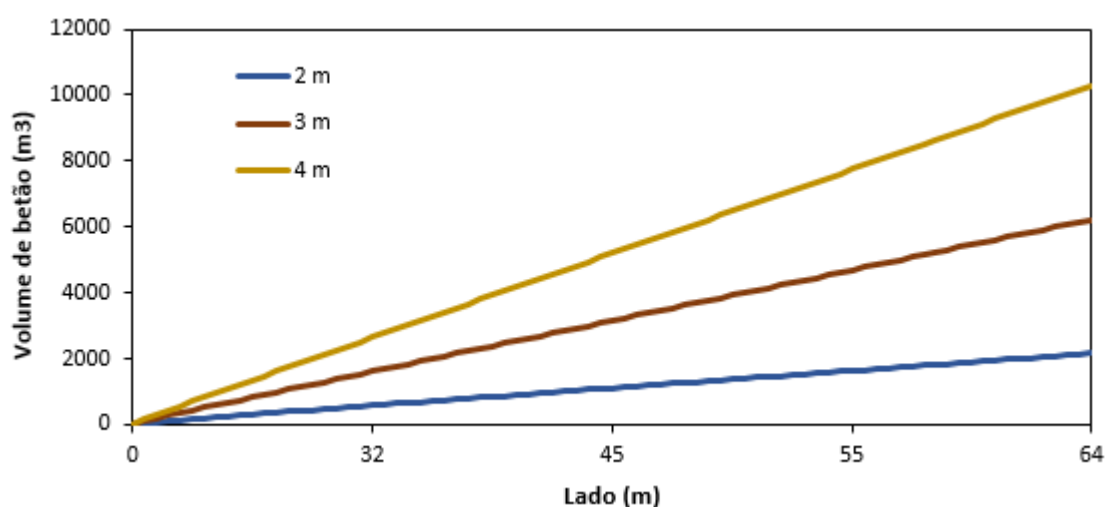


Figura 3.8 – Volume de betão necessário para diferentes alturas de bacia.

Na Figura 3.9 pode observar-se os custos total betão por  $m^3$  para a zona de Coimbra com base nos valores do Quadro 3.1.

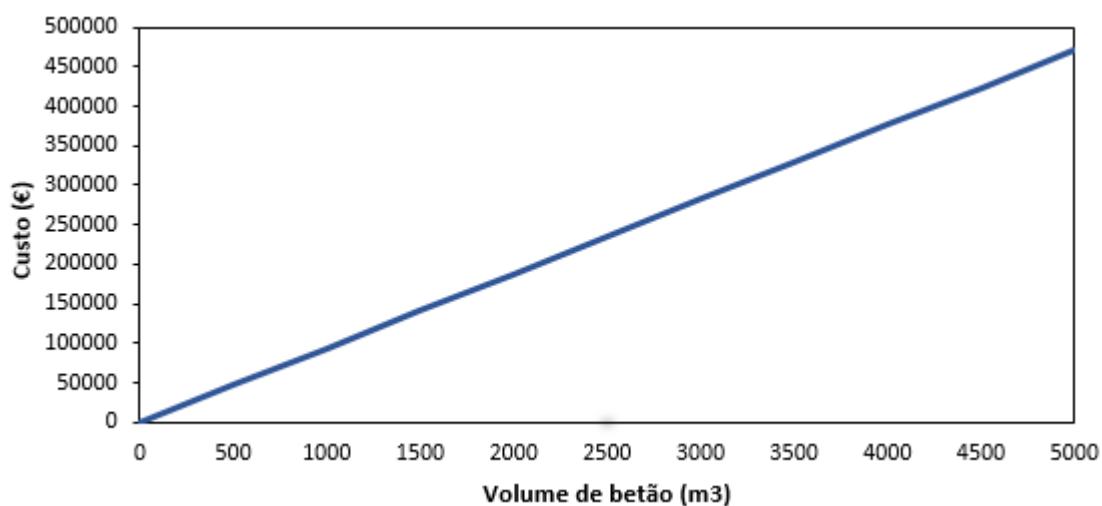


Figura 3.9 – Custo em euros do  $m^3$  de betão.

Na Figura 3.10 pode observar-se os custos total escavação por  $m^3$  para a zona de Coimbra com base nos valores do Quadro 3.1.

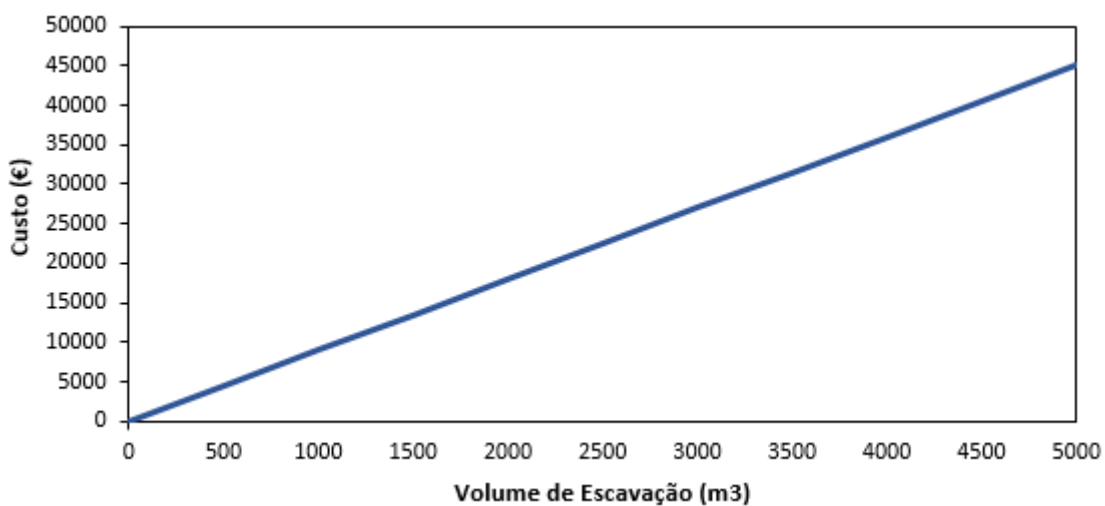


Figura 3.10 – Custo em euros por  $m^3$  de escavação.

## 4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

### 4.1 Estudo de caso – Bacia da zona central de Coimbra

#### 4.1.1 Introdução

A bacia da zona central de Coimbra, apresentada no subcapítulo 3.1, contém zonas problemáticas onde a partir de episódios de precipitação extrema dá-se um aumento significativo das escorrências superficiais que originam aparecimento de água à superfície, em situações onde a rede de coletores ainda não entrou e carga. Uma das razões para este problema é a grande inclinação das ruas que permite que uma grande quantidade de água não entre na rede de coletores.

Junto a isto ainda se soma uma outra agravante, as alterações climáticas, e consequente aumento da intensidade de precipitação, o que somando à topografia do terreno amplifica o problema da acumulação de água à superfície nesta bacia.

O combate a este problema será feito através da implementação de bacias de retenção. A escolha do local da implementação das bacias teve em conta dois fatores: o espaço para construção; e a quantidade de água a drenar. De acordo com Machado (2013) a implantação de uma bacia apenas na Praça da República não é uma boa solução, pois não evita o aparecimento de água à superfície no Estacionamento do Mercado e na Praça 8 de Maio.

Assim sendo, criaram-se três soluções distintas para testar os problemas registados na bacia. Primeiro analisou-se a rede sem bacias (Solução 0), depois analisaram-se duas soluções contendo alternadas ou em simultâneo, bacias na Praça da República e no Estacionamento junto ao Mercado (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 - Soluções de locais de implementação de bacias de retenção.

		Solução 0	Solução 1	Solução 2
Bacia	Praça da República	X	X	✓
	Estacionamento do Mercado	X	✓	✓

Em função dos locais de implantação das bacias de retenção, selecionaram-se os pontos onde serão feitas as leituras de resultados. A Figura 4.1 é uma representação esquemática destes locais.



Figura 4.1 – Vista aérea dos locais de implantação das bacias: I – Praça da República; II – Estacionamento em frente ao Mercado Municipal, e locais onde foram implementadas sondas numéricas para leitura de resultados.

Os pontos de controlo foram escolhidos tendo em conta a localização das bacias de retenção, e os locais onde essa mudança na rede surtirá mais impacto quer nos caudais superficiais, quer nos caudais no interior das condutas. De seguida apresentaram-se as razões de escolha dos locais de controlo.

Local A – Localiza-se a jusante da Praça da República. É importante a análise a este local para se conhecer o impacto que a bacia I tem na rede de drenagem.

Local B – Localiza-se no Estacionamento do Mercado Municipal. É importante a sua análise para que se perceba a quantidade de caudal a reter pela bacia II, assim como também, para se conhecer o impacto que a bacia I tem em zonas mais a jusante da rede.

Local C – Localiza-se entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos e a Praça 8 de Maio. É interessante a análise deste local pois esta é uma zona crítica no que diz respeito ao aparecimento de água à superfície.

#### **4.1.2 Implementação das bacias no *software* SWMM**

O *software* SWMM não permite a criação de bacias de retenção de uma forma direta. Desta forma a implementação das bacias foi feita recorrendo às ferramentas disponíveis.

Como referido no subcapítulo 2.4.2.1 as bacias de retenção são constituídas por quatro elementos que foram introduzidos na rede da seguinte forma:

- Corpo da bacia: A introdução do corpo da bacia foi feita recorrendo a uma *storage unit* (unidade de armazenamento) e definidas a sua altura e área.
- Dispositivo de entrada de água: Foram inseridas condutas com o objetivo de desviarem a água da rede superficial e de coletores para a bacia. As condutas inseridas têm as mesmas características das condutas das quais se pretende desviar o caudal para o interior da bacia.
- Dispositivos de segurança: Foram adicionados orifícios ao corpo da bacia orifícios destinados a garantir o esgotamento das águas em caso de emergência. Os orifícios escoam para a superfície de forma a prevenir um rebentamento da bacia ou das condutas subterrâneas em caso de excesso de volume de água.
- Descarregadores de fundo: Foram inseridas condutas, tal como as condutas de entrada de água, mas agora com o objetivo de fazer a ligação entre o corpo da bacia e as condutas a jusante. O diâmetro máximo destas condutas é tal que o caudal a chegar às condutas de jusante não seja superior no mínimo a 50% da capacidade desse coletor.

#### **4.1.3 Soluções Implementadas**

Após serem definidos os locais de implementação de bacias e os seus elementos constituintes prosseguiu-se para a determinação das dimensões das bacias. Para tal, seguiram-se as etapas abaixo indicadas.

- Identificação dos caudais a desviar para cada bacia. Optou-se por redirecionar as condutas com caudais mais significativos, assim como, caminhos superficiais com quantidades de água significativas. As condutas com caudais residuais não foram desviadas.
- Pré-dimensionamento das bacias com recurso à equação (11). Os volumes do pré-dimensionamento não correspondem aos volumes finais. Os volumes finais são resultado de sucessivas iterações no decorrer de várias simulações.

- Atribuição da mesma altura para todas as bacias de forma a se poderem comparar resultados. A altura atribuída foi de 2,6 metros.
- Determinação do caudal máximo que as condutas da rede podem escoar. Tendo em consideração o caudal máximo de cada conduta foi feito a limitação do caudal através da diminuição da área das condutas que estabelecem a ligação entre a bacia e as condutas de jusante.

No Quadro 4.2 apresenta-se os resultados finais relativos a área, volume e percentagem de diâmetro reduzido para cada solução e para cada cenário. Estes resultados foram obtidos através de processos iterativos no decorrer de várias simulações.

Quadro 4.2 – Características das bacias de retenção correspondentes a cada solução.

Solução	Cenário	Bacia Praça da República			Bacia Estacionamento do Mercado		
		Área (m <sup>2</sup> ) <sup>(1)</sup>	Volume (m <sup>3</sup> )	% de redução do diâmetro <sup>(2)</sup>	Área (m <sup>2</sup> ) <sup>(1)</sup>	Volume (m <sup>3</sup> )	% de redução do diâmetro <sup>(2)</sup>
1	Actual	-	-	-	500	1300	
	IPCC - 10%	-	-	-	550	1430	20%
	IPCC - 20%	-	-	-	650	1690	
	RCP 8.5	-	-	-	650	1690	
2	Actual	150	390		475	1235	
	IPCC - 10%	175	455	20%	500	1300	20%
	IPCC - 20%	200	520		600	1560	
	RCP 8.5	200	520		575	1495	

<sup>(1)</sup>Área igual ao longo de toda a altura da bacia

<sup>(2)</sup>Em relação à capacidade máxima do coletor de jusante

#### 4.1.4 Resultados

Os resultados serão expostos de forma a realçar as diferenças entre as várias soluções, assim como também para os diferentes cenários climáticos. Por limitações de espaço apenas serão apresentados os resultados obtidos para as soluções adotadas como indicado na Figura 4.1 e para simulações realizadas para chuvadas com tempo de retorno de 100 anos para os diferentes cenários.

##### 4.1.4.1 Solução 0

O gráfico da Figura 4.2 apresenta o escoamento nas condutas imediatamente após a Praça da República para os diferentes cenários climáticos e para a solução 0.

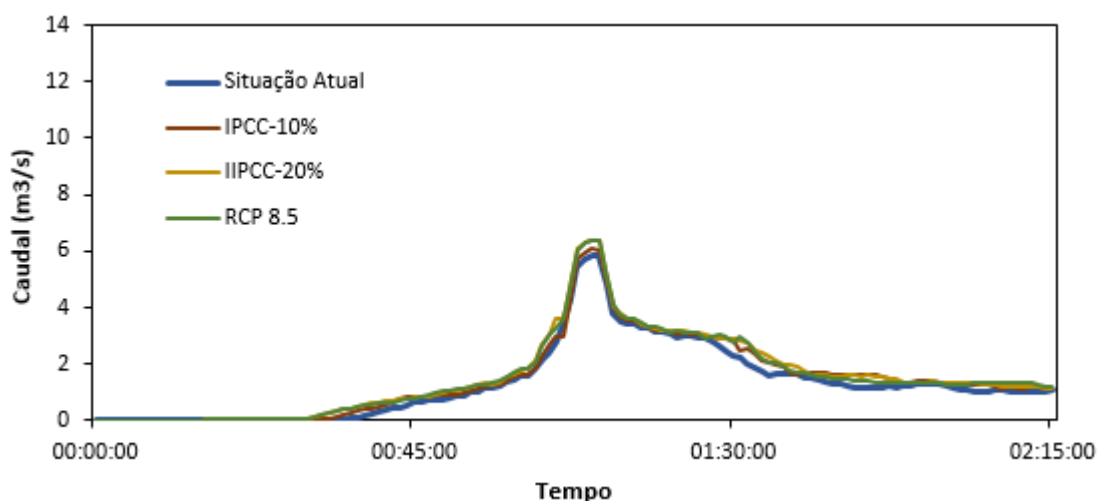


Figura 4.2 – Caudal registado nos coletores (138.1 + 1\_536.1) da Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 0.

O gráfico da Figura 4.3 apresenta o caudal registado à superfície para os diferentes cenários e para a solução 0.

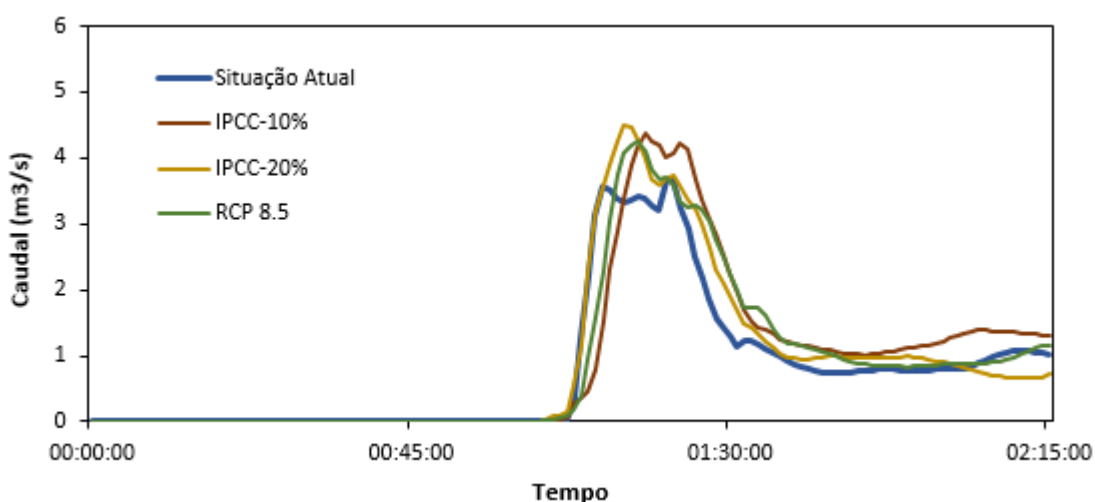


Figura 4.3 – Caudal registado à superfície (138.A + PON\_2047.A) da Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 0.

O gráfico da Figura 4.4 apresenta o escoamento nas condutas na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para os diferentes cenários e para a solução 0.



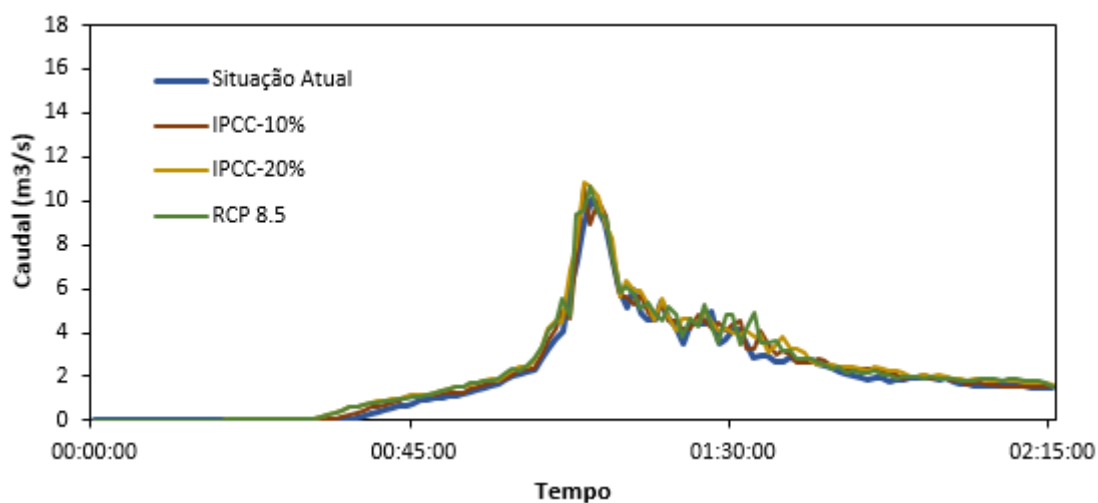


Figura 4.4 - Caudal registado nos coletores (308.1) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 0.

O gráfico da Figura 4.5 apresenta o caudal registado à superfície na Avenida Sá da Bandeira, Pré Estacionamento do Mercado para os diferentes cenários e para a solução 0.

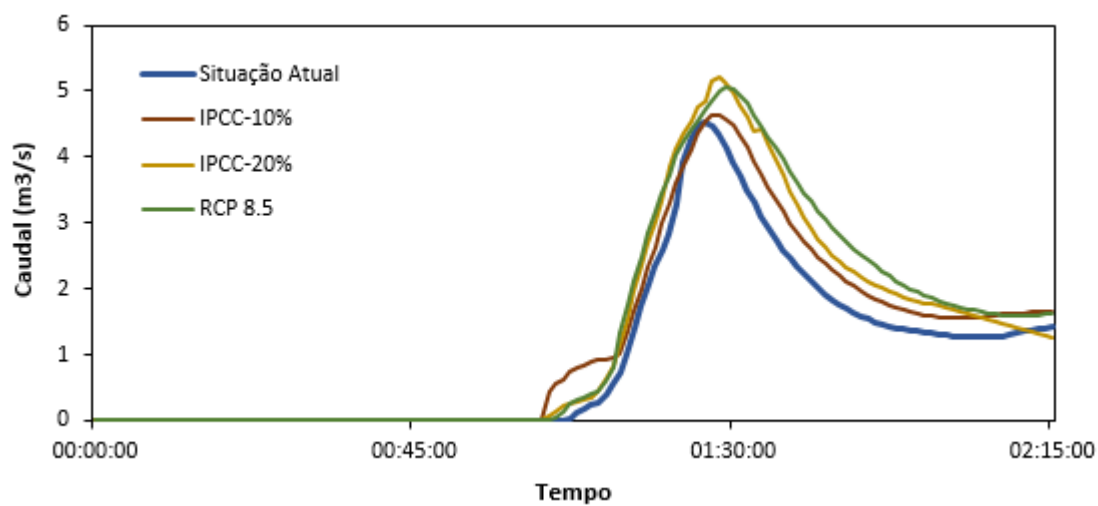


Figura 4.5 - Caudal registado à superfície (340.A) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 0.

O gráfico da Figura 4.6 apresenta o escoamento nas condutas entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos e a Praça 8 de Maio para os diferentes cenários e para a solução 0.

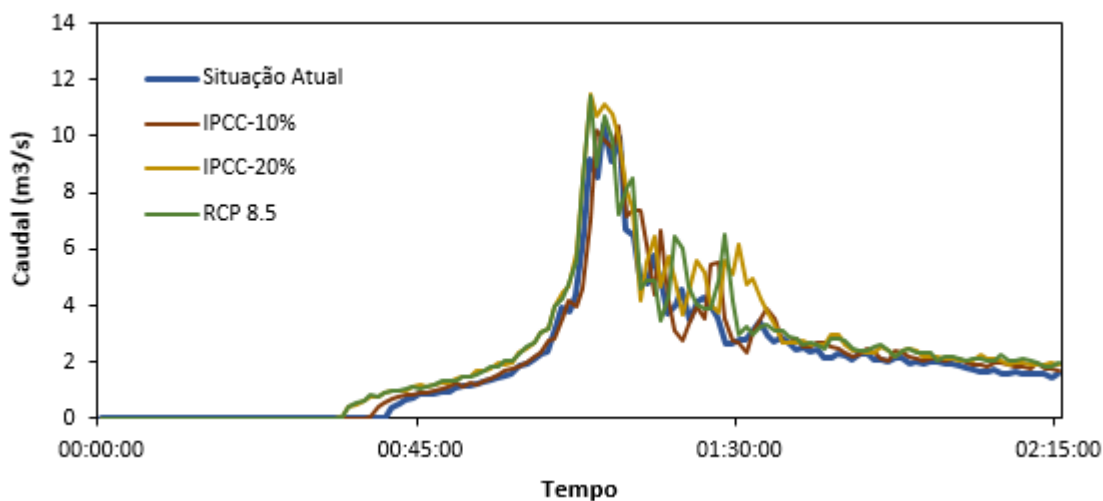


Figura 4.6 - Caudal registado nos coletores (517.1+588.1) na entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos e a Praça 8 de Maio para a solução 0.

O gráfico da Figura 4.7 apresenta o caudal registado à superfície na Praça 8 de Maio para os diferentes cenários e para a solução 0.

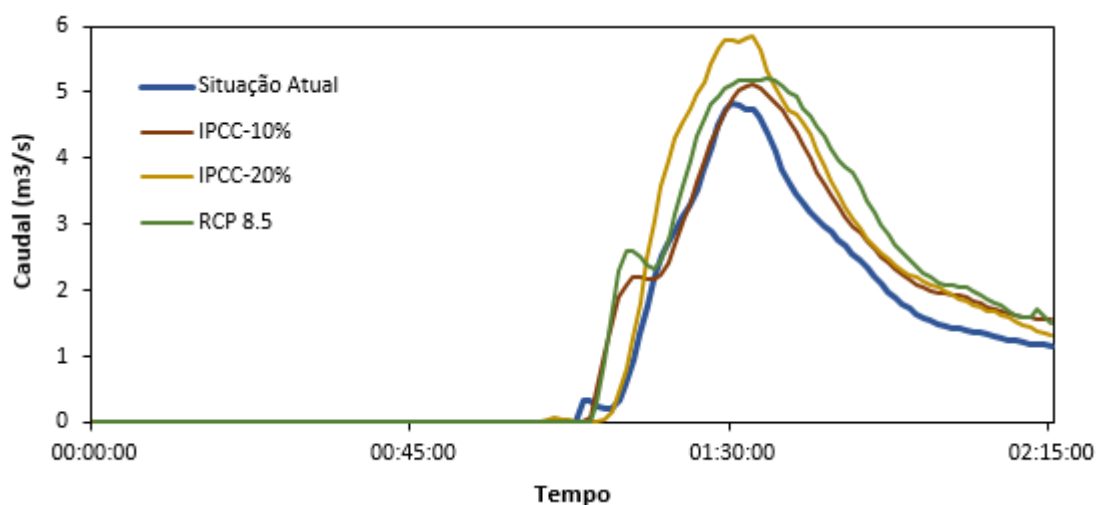


Figura 4.7 - Caudal registado à superfície (1\_677.A) na Praça 8 de Maio para a solução 0.

Para esta solução importa realçar o elevado caudal à superfície para os três locais e para os diversos cenários. É real a necessidade de adaptação da rede mesmo para a situação atual. Nas soluções 1 e 2 tenta-se resolver o problema com a implementação de bacias de retenção.

#### 4.1.4.2 Solução 1

O gráfico da Figura 4.8 apresenta o escoamento nas condutas imediatamente após a Praça da República para os diferentes cenários e para a solução 1.

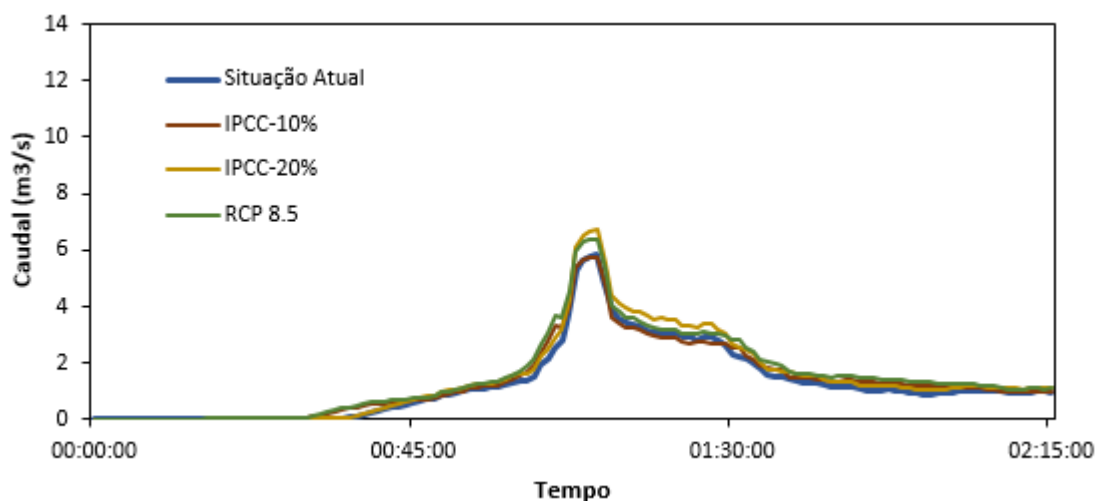


Figura 4.8 - Caudal registado nos coletores (138.1 + 1\_536.1) na Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 1.

O gráfico da Figura 4.9 apresenta o caudal à superfície imediatamente após a Praça da República para os diferentes cenários e para a solução 1.

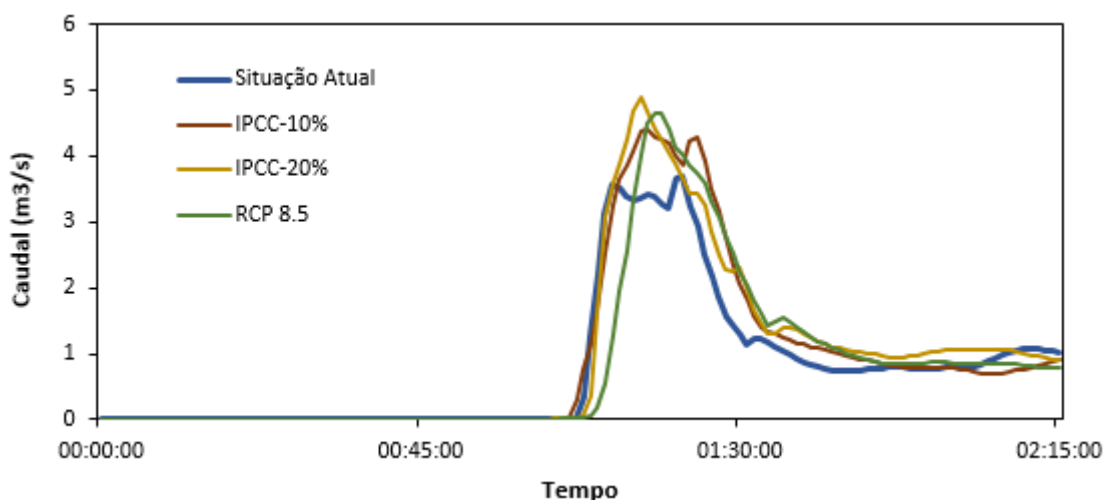


Figura 4.9 - Caudal registado à superfície (138.A + PON\_2047.A) na Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 1.

O gráfico da Figura 4.10 apresenta o escoamento nas condutas pré Estacionamento do Mercado para os diferentes cenários e para a solução 1.

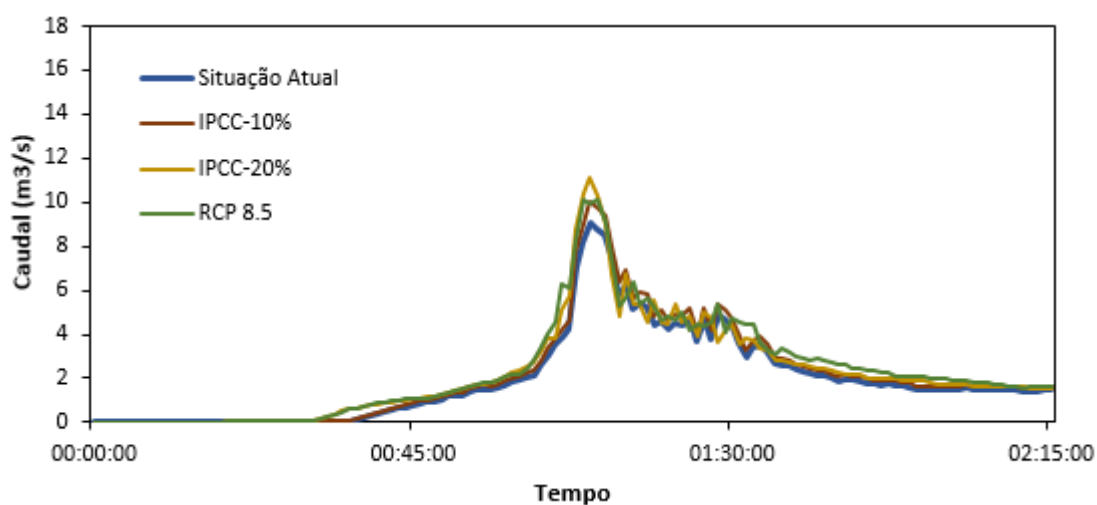


Figura 4.10 - Caudal registado nos coletores (308.1) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para e solução 1.

O gráfico da Figura 4.11 apresenta o caudal registado à superfície na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para os diferentes cenários e para a solução 1.

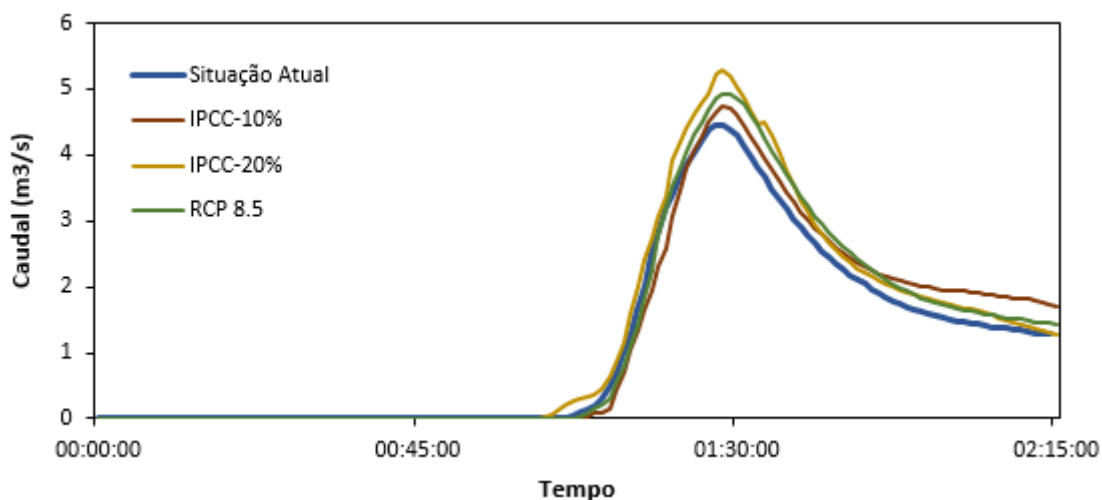


Figura 4.11 - Caudal registado à superfície (340.A) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 1.

Para esta solução é de realçar que imediatamente após a Praça da República, ao contrário do que se verifica na solução 1, existe um aumento do caudal no interior das condutas e uma diminuição significativa do caudal à superfície. Este facto deve-se à implantação da bacia na Praça da República.

O gráfico da Figura 4.12 representa o escoamento nas condutas entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos e a Praça 8 de Maio para os diferentes cenários e para a solução 1.

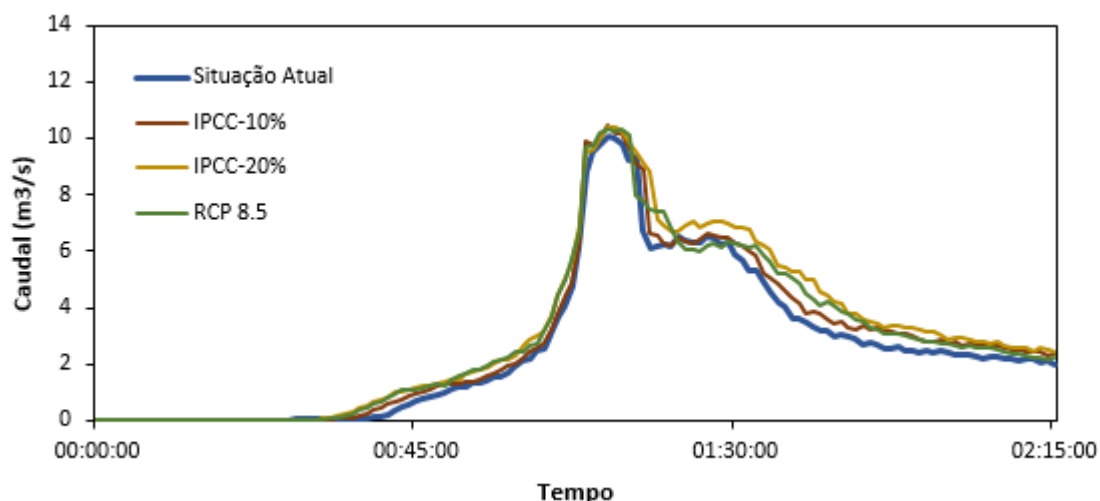


Figura 4.12 - Caudal registado nos coletores (517.1+588.1) entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos na Praça 8 de Maio e para a solução 1.

O gráfico da Figura 4.13 apresenta o caudal registado à superfície na Praça 8 de Maio para os diferentes cenários e para a solução 1.

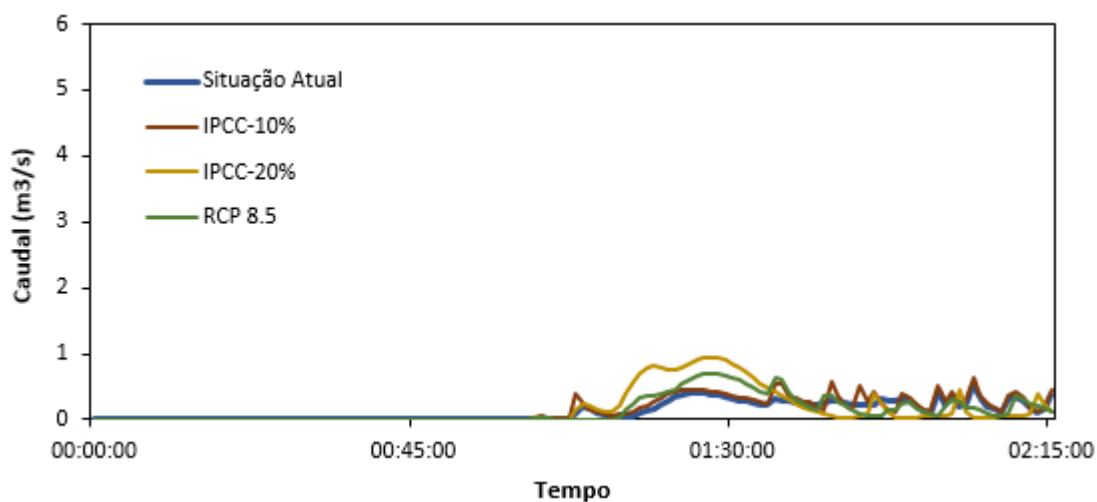


Figura 4.13 - Caudal registado à superfície (1\_677.A) na Praça 8 de Maio para a solução 1.

Para esta solução importa salientar a redução de caudal à superfície na Praça 8 de Maio para todos os cenários. É importante também referir que na Praça da República os caudais à superfície são significativos.

#### 4.1.4.3 Solução 2

O gráfico da Figura 4.14 apresenta o escoamento nas condutas imediatamente após a Praça da República para os diferentes cenários e para a solução 2.

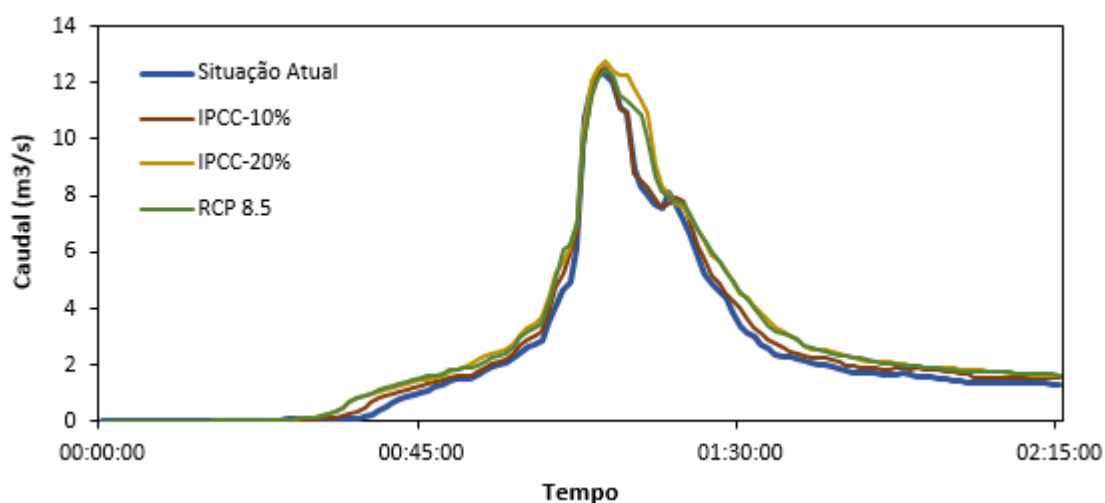


Figura 4.14 - Caudal registado nos coletores (138.1 + 1\_536.1) na Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 2.

O gráfico da Figura 4.15 apresenta o caudal à superfície imediatamente após a Praça da República para os diferentes cenários e para a solução 2.

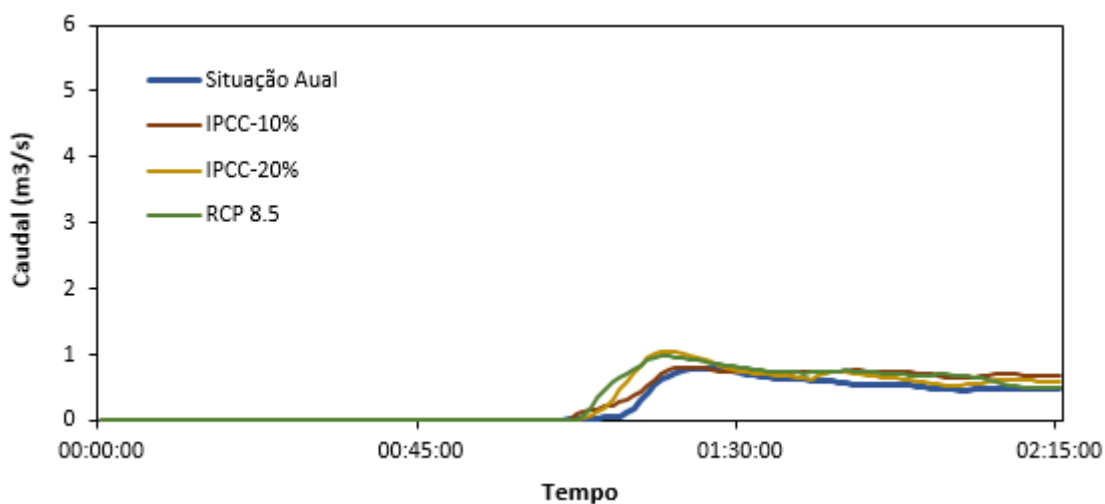


Figura 4.15 - Caudal registado à superfície (138.A + PON\_2047.A) na Av. Sá da Bandeira imediatamente após a Praça da República para a solução 2.

Para este local, importa referir que a implantação da bacia na Praça da República provoca uma diminuição do caudal à superfície e como resultado, um aumento do caudal no interior dos coletores.

O gráfico da Figura 4.16 apresenta o escoamento nas condutas na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para os diferentes cenários e para a solução 2.

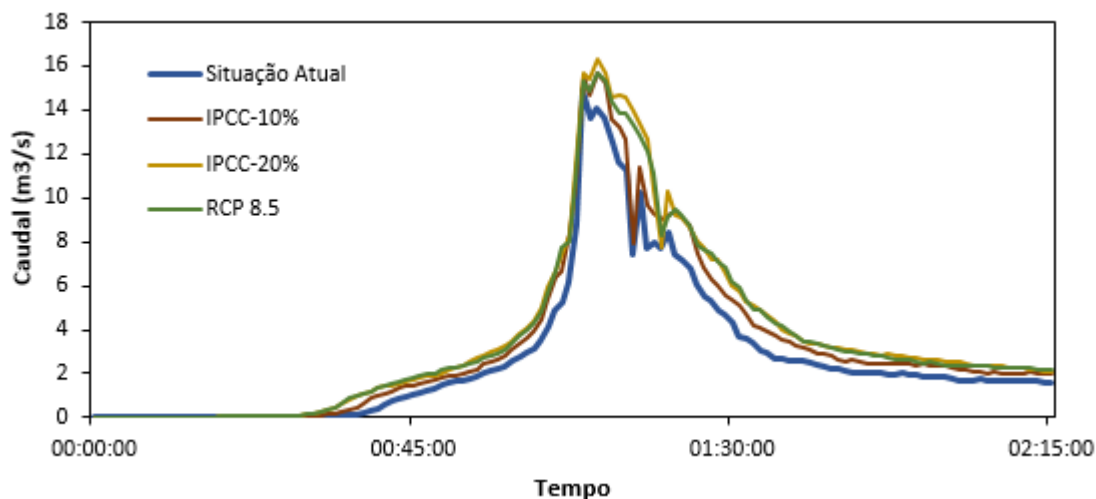


Figura 4.16 - Caudal registado nos coletores (308.1) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 2.

O gráfico da Figura 4.17 apresenta o caudal registado na Avenida Sá da Bandeira, Pré Estacionamento do Mercado à superfície para os diferentes cenários e para a solução 2.

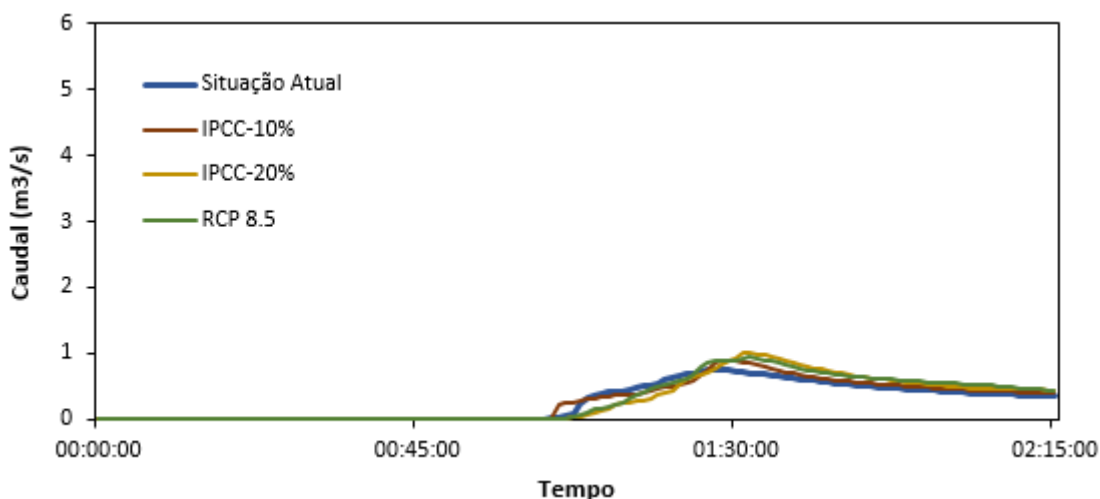


Figura 4.17 - Caudal registado à superfície (340.A) na Avenida Sá da Bandeira, pré Estacionamento do Mercado para a solução 2.

O gráfico da Figura 4.18 apresenta o escoamento nas condutas entre Banco Central Caixa Geral de Depósitos e a Praça 8 de Maio para os diferentes cenários e para a solução 2.



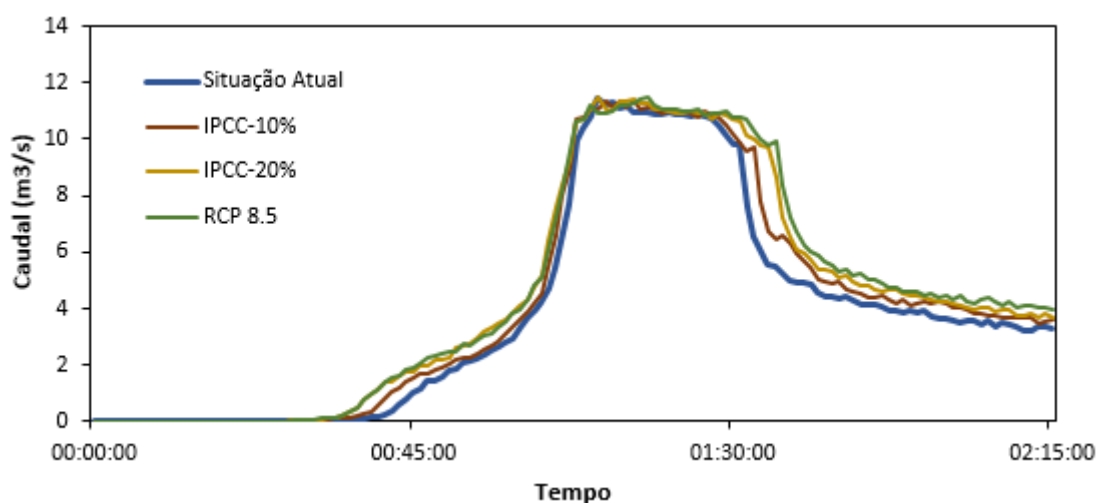


Figura 4.18 - Caudal registado nos coletores (517.1+588.1) entre o Banco Central Caixa Geral de Depósitos e a Praça 8 de Maio para a solução 2.

O gráfico da Figura 4.19 apresenta o caudal registado à superfície na Praça 8 de Maio para os diferentes cenários e para a solução 2.

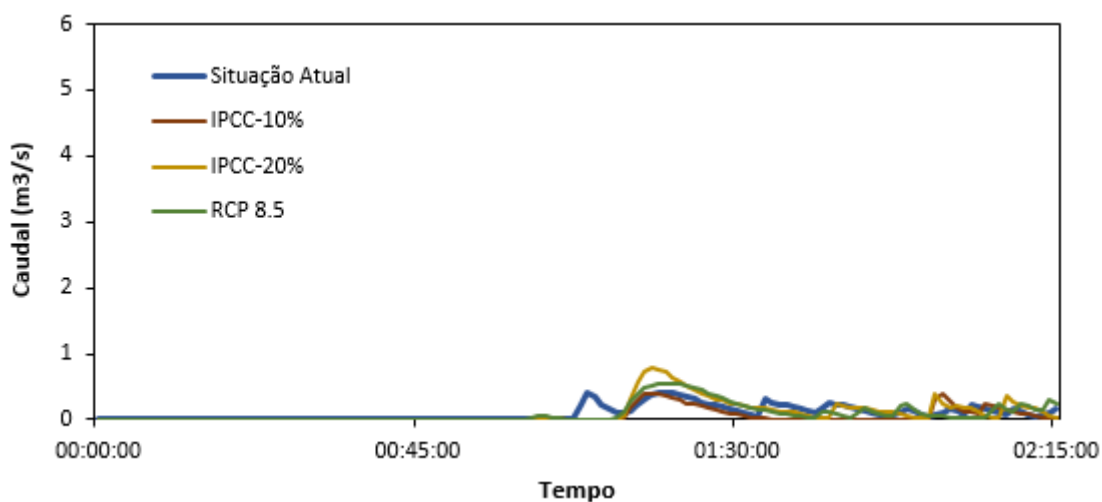


Figura 4.19 - Caudal registado à superfície (1\_677.A) na Praça 8 de Maio para a solução 2.

Para esta solução importa referir que é solucionado o problema de aparecimento de água à superfície para os três locais de registo.

A partir destes resultados conclui-se que as soluções 1 e 2 são viáveis no que se refere à extração de água a superfície na Praça 8 de Maio. A solução 1 não resolve o problema de aparecimento de água à superfície na Praça da República, a solução 2 por oposição resolve este problema.

#### 4.1.5 Análise de Resultados

Após a análise dos resultados tiram-se algumas conclusões acerca da viabilidade de cada uma das soluções, tanto a nível hidráulico como a nível económico.

O impacto das alterações climáticas no sistema de drenagem da bacia da zona de estudo é claro. As exaustivas simulações para as várias soluções e para as diferentes metodologias permitem concluir que a percentagem de aumento de caudais se situa entre os 3% e os 25% em relação à situação atual, nos diversos pontos da rede.

A modelação das características das bacias de retenção para os diversos cenários foi necessária, e mais uma vez, ajuda a entender o impacto que as alterações climáticas exercem sobre a rede. As percentagens de aumento de volume (em relação à situação atual) para as diversas soluções apresentam-se no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Percentagem de aumento de volume das bacias de retenção para as três soluções face às alterações climáticas.

	Solução 1			Solução 2		
	IPCC-10%	IPCC-20%	RCP8.5	IPCC-10%	IPCC-20%	RCP8.5
% Aumento de Volume <sup>(1)</sup>	12%	25%	21%	8%	22%	20%

<sup>(1)</sup>Em relação à situação atual

A análise do comportamento hidráulico para as três soluções individualmente permite chegar a algumas conclusões a respeito da sua viabilidade hidráulica.

**Solução 1** – A bacia na zona do Estacionamento em Frente ao Mercado resolve o problema de aparecimento de água à superfície da Praça 8 de Maio, encaminhando-a para os coletores de forma eficaz. O problema subsiste no aparecimento de água à superfície nas zonas pré Estacionamento do Mercado.

**Solução 2** – O desvio da água na Praça da República impede o aparecimento de água nas zonas mais a montante da bacia, contrariamente à solução 1. A bacia implementada na Praça da República impede o aparecimento de água na Praça 8 de Maio, ficando assim o problema do aparecimento de água à superfície resolvido.

Na análise económica apenas se teve em conta o custo da construção das bacias não tomando em conta as vantagens e desvantagens de cada solução e assim sendo os danos que cada uma evitaria. O método aplicado para a estimativa dos custos encontra-se detalhado no subcapítulo 3.2.6. Os custos totais de cada solução e para cada cenário apresentam-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Custos das bacias para as diferentes soluções.

Solução	Cenário	Volume Total (m3)	Volume de Betão (m3) <sup>(1)</sup>	Custo Total (€)
1	Actual	1300	320,1	41 852,8
	IPCC - 10%	1430	348,5	45 696,5
	IPCC - 20%	1690	404,8	53 343,1
	RCP 8.5	1690	404,8	53 343,1
2	Actual	1625	390,8	51 434,5
	IPCC - 10%	1755	418,8	55 246,1
	IPCC - 20%	2080	488,5	64 732,6
	RCP 8.5	2015	474,6	62 838,9

<sup>(1)</sup>Volume de betão para paredes de 25cm de espessura

Observando o Quadro 4.4 pode dizer-se que a solução 2 é sem dúvida a mais económica sendo a solução 3 a mais dispendiosa. No gráfico da Figura 4.20 pode observar-se os custos das soluções para os vários cenários.

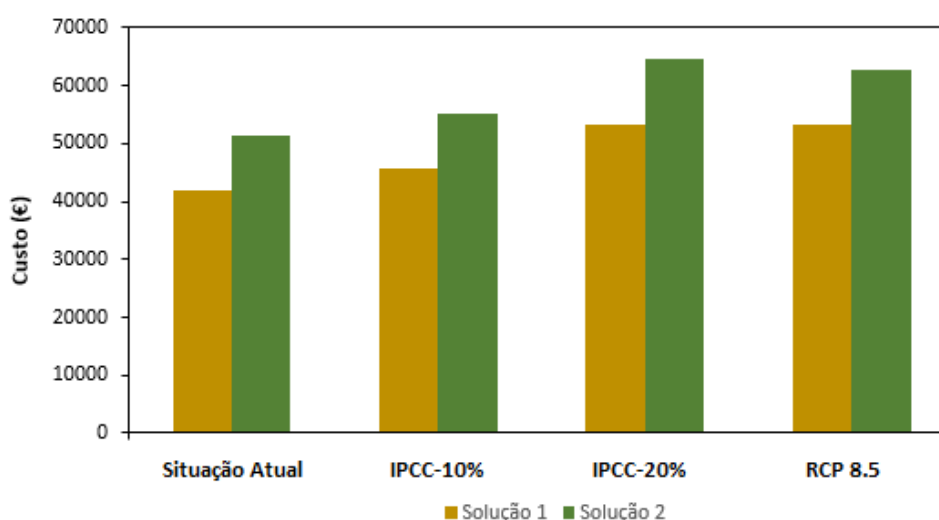


Figura 4.20 – Custos das soluções para os vários cenários.

As percentagens de aumento de custos derivado do impacto das alterações climáticas apresentam-se no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Percentagens de aumento de custos.

% Aumento de Custo <sup>(1)</sup>	Solução 1			Solução 2		
	IPCC-10%	IPCC-20%	RCP8.5	IPCC-10%	IPCC-20%	RCP8.5
	10%	22%	22%	12%	21%	18%

<sup>(1)</sup>Em relação à situação atual

É de realçar que a percentagem de aumento de custo devido às alterações climáticas não se reflete de uma forma linear. Como se pode verificar o aumento do custo é bastante irregular, ainda assim com mais impacto para as adaptações com maior aumento de intensidade de precipitação, tal como esperado.

Conclui-se que existe um aumento ainda significativo no custo das soluções para os vários cenários em particular para os cenários mais altos. Em percentagem esse aumento traduz-se em custos elevados de 10% a 22%. Para um cenário de altas emissões e para a solução 3 este aumento é superior a 13 000 € o que torna bem claro a necessidade de se tomarem medidas de adaptação da rede o mais cedo possível.

#### 4.1.6 Instabilidades numéricas nos cálculos do SWMM

O SWMM não deteta os problemas de instabilidade numérica, segundo EPA (2012) a verificação das instabilidades existentes numa determinada simulação deve ser feita pelos utilizadores.

Os problemas de instabilidade eram previsíveis e de acordo com EPA (2012) devem-se a vários fatores tais como: condutas fechadas a operarem na sua capacidade máxima, condutas curtas, entre outros. Estes problemas são bastantes visíveis nos hidrogramas de escoamento.

As instabilidades numéricas no cálculo da propagação da onda dinâmica podem ser diminuídas reduzindo os intervalos e tempo, utilizando a opção de passo de tempo variável com um fator de passo de tempo menor e selecionando alongamento artificial de condutas curtas EPA (2012). Fazendo uso destas noções fizeram-se várias simulações na rede em estudo com passos de cálculo muito pequenos e intervalos de tempo bastante reduzidos conseguindo assim melhores resultados nos gráficos de escoamento, no entanto, o problema não foi totalmente resolvido.

A introdução de bacias de retenção na rede provoca resultados diferentes nas condutas a montante da localização da bacia (Machado, 2013). Em simulações na bacia da zona central de Coimbra com um total de 2022 nós e 7512 condutas, as diferenças verificadas nos resultados obtidos no modelo ficam assim explicadas.

## 5 CONCLUSÕES/TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Portugal devido às suas características está muito exposto ao risco de cheias. As alterações nos regimes de precipitação, frequência e intensidade de fenómenos meteorológicos e climáticos extremos conduzirá a danos significativos no nosso território, com graves consequências económicas e humanas.

Os cenários climáticos regionalizados para Portugal, obtidos por meio de modelos climáticos, indicam um aumento na intensidade de precipitação na ordem dos 10% a 20% até ao final do século XXI. Este aumento acompanha maiores quantidades de água a entrar nos sistemas de drenagem, que aliados à crescente urbanização e redes e drenagem débeis gera necessidade de adaptação dos sistemas de drenagem existentes.

O aumento constante das redes de drenagem não é viável pois a partir de certos valores de caudal a drenar atingiriam dimensões absurdas e por outro lado as redes já existem. Por este motivo torna-se fundamental o controlo na origem das águas pluviais. É desta forma que nasce o conceito de SUDS, Sistema Urbanos de Drenagem Sustentável. Os SUDS são uma sequência de práticas de gestão de água e instalações projetadas para drenar a água à superfície de uma maneira mais sustentável do que a prática convencional de escoamento rápido das águas através de condutas para os cursos de água.

No presente trabalho, foram estudadas soluções onde se introduziram bacias de retenção. O objetivo destes dispositivos é o armazenamento das águas pluviais, regularizando os caudais da rede, e permitindo a restituição de caudais compatíveis com a capacidade das condutas da rede a jusante. A sua vantagem primordial é a redução dos caudais de ponta, reduzindo assim o risco de inundação. No entanto, estas possuem múltiplos fins tais como, criação de polos de interesse recreativo, proteção do ambiente, com o aumento da qualidade de água, nomeadamente devido à redução do teor de sólidos em suspensão e matéria orgânica, assim como podem constituir reservas importantes de água para rega e combate a incêndios.

A implementação das bacias foi feita num modelo da bacia da zona central de Coimbra o que foi modelado com drenagem dual, pois como anteriormente referido, muitas vezes não estando o sistema de coletores em carga existe aparecimento de água à superfície.

A introdução das bacias na rede de drenagem e a sua adaptação à rede para que sejam eficazes custa as inúmeras simulações feitas para que se entendesse quais as condutas mais sensíveis à sua implementação e a quantidade de caudal que se poderia expulsar das bacias por meio a se conseguirem resultados hidráulicos satisfatórios. Realizaram-se simulações para tempos de retorno de 100 anos e para quatro cenários diferentes: IPCC-10%, IPCC-20%, RCP 8.5 e para o cenário atual.

Analisados os resultados foi possível saber quais as melhores soluções, quer a nível hidráulico, quer a nível económico, assim como também, se perceber qual o impacto na rede de drenagem do aumento das intensidades das chuvadas de projeto para os diferentes cenários climáticos

A solução 1 resolve o problema do aparecimento de água à superfície na Praça 8 de Maio devido à bacia implementada no Mercado. Esta solução não resolve o problema do aparecimento de água à superfície nas zonas a montante da bacia implementada. Este problema resolve-se na solução 2 com a implementação de uma bacia de retenção na Praça da República. Em termos hidráulicos a solução 2 é a melhor solução evitando o aparecimento de água nos diversos pontos da rede. A solução 1 é a mais económica de todas as soluções.

As medidas de adaptação propostas nesta dissertação alcançaram os seus objetivos e comprovam que as bacias de retenção são dispositivos que atuam no foco do problema, atenuando os efeitos negativos originados pelas cheias urbanas. Para a escolha de uma solução no futuro teria de ser feita uma análise mais rigorosa ao custo de cada uma das soluções, fazendo uma estimativa dos danos causados pela presença de água à superfície entre a Praça da República e o Mercado. O estudo do parque de estacionamento do Mercado como bacia de retenção pode também ajudar a reduzir os custos das soluções 1 e 2.

Em termos climáticos pode dizer-se que como esperado o cenário IPCC-20% é o que mais impacto tem os volumes de água totais com uma percentagem de aumento necessário de volumes para as bacias de retenção na ordem dos 20% a 25% para as 2 soluções. O cenário RCP 8.5 tem um impacto ligeiramente inferior ao cenário IPCC-20%, ainda assim, na ordem dos 20% igualmente para as três soluções. Como esperado o cenário IPCC-10% é o que causa um menor impacto, com percentagens de aumento de volume entre os 8% e os 10%. Em suma, para ambos os cenários, alto cenário e baixo cenário, o impacto em termos de caudal acedido à rede é significativo e requer uma adaptação da rede.

No que diz respeito a custos é claro o impacto que as alterações climáticas acarretam. Em termos de volumes de bacias, para as soluções propostas neste trabalho, o aumento é de 10% a 22% o que corresponde a milhares de euros. É importante salientar que os encargos anuais de manutenção e reabilitação dos sistemas de drenagem irão sofrer um aumento pelo que, uma adaptação imediata dos sistemas de drenagem reduz a severidade do impacto das alterações climáticas.

Este estudo leva a uma conclusão final de que se devem tomar medidas de mitigação, para que sejam emitidas menores quantidades de GEE, e assim obtermos cenários climáticos futuros mais suaves a longo prazo. Por outro lado, deve-se adaptar/ajustar os sistemas naturais ou humanos em resposta a estímulos reais ou estímulos climáticos esperados, para que se moderem os danos ou explorar oportunidades benéficas.

## **5.2 Trabalhos Futuros**

A influência das mudanças climáticas sobre a drenagem urbana é considerável tendo um impacto significativo na eficiência dos sistemas de drenagem. Como tal, seria de todo interessante aprofundar o estudo dos fatores climáticos para Portugal e para a cidade de Coimbra em particular podendo-se obter fatores com base nas séries históricas da cidade de forma a quantificar de forma mais exata o impacto das alterações climáticas nas redes de drenagem da cidade.

O estudo da implementação de outros tipos de SUDS recorrendo às novas ferramentas do *software* SWMM 5.1 (relativas à modelação da qualidade de água) conjuntamente com a implementação de bacias de retenção seria também interessante com vista ao melhoramento da *performance* da rede de drenagem assim como também à obtenção de soluções mais económicas e sustentáveis.

Um estudo aprofundado das limitações do SWMM relativamente à drenagem dual com vista a melhorar a soluções seria interessante. A elaboração deste trabalho em diferentes *softwares* com maiores potencialidades seria bastante importante no sentido de se poder comparar os resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, J., Bristot, G., Costa, A., Moncunnil, D., Silva, E., Santos, A., Barbosa, W., Nóbrega, D., Filho, V. e Souza, I. (2003). "Uma aplicação da técnica de “downscaling” dinâmico no setor norte da região nordeste do Brasil". *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.18, n.2, 161-180.

Arnbjerg-Nielsen, K. (2008). "Quantification of climate change impacts on extreme precipitation used for design of sewer systems". 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

Arnbjerg-Nielsen, P. (2012). "Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high resolution hydrologic design". *Urban Water Journal*, v.9, n.2, 57-65.

Arnbjerg-Nielsen, P., Willems, J., Olsson, J., Beecham, S., Pathirana, A., Bülow Gregersen, I., Madsen, H. e Nguyen, V.-T.-V. (2013). "Impacts of climate change on rainfall extremes and urban drainage systems: a review". *Water Science & Technology*, v.68, n.1, 16-28.

Brandão, C., Rodrigues, R. e Costa, J.P. (2001). "Precipitações intensas em Portugal Continental". Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, INAG, Lisboa.

Buonomo, E., Jones, E., Huntingford, C. e Hammafard, J. (2007). "On the robustness of changes in extreme precipitation over Europe for two high resolution climate change simulations". *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.133, n.622, 65-81.

Butler, D. e Davies, J. W. (2011). "Urban Drainage". Taylor & Francis, London.

Casas-Castillo M.C. e Rodríguez-Solà R., comunicação pessoal, 23 de Maio de 2014.

Chow, V. T., Maidment, D. R. e Mays, L. W. (1988). "Applied Hydrology". McGraw-Hill Book Company, New York.

CIRAC (2013). "Cartas de Inundações e de Risco em Cenários de Alterações Climáticas". Associação Portuguesa de Seguradores (APS) e Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.

Clemens, F. H. L. R. (2001). "Hydrodynamic Models in Urban Drainage: Application and Calibration". DUP Science, Delft.



CO@. <http://clickobra.com/arquitetura/captacao-de-agua-da-chuva-e-sustentavel-e-gera-economia>. Acedido a 6 de Junho de 2014.

Djordjevic, S., Prodanovic, D., e Maksimovic, C. (1999). "An approach to simulation of dual drainage". *Water Science and Technology*, v.39, n.9, 95–103.

ESACB. [http://repositorio.ipcb.pt/handle/10400.11/485?mode=full&submit\\_simple=Mostrar+registro+em+formato+completo](http://repositorio.ipcb.pt/handle/10400.11/485?mode=full&submit_simple=Mostrar+registro+em+formato+completo). Acedido a 18 de Março de 2014.

EPA, Manual SWMM - Modelo de Gestão de Drenagem Urbana - Version 5 (2012). Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica de Saneamento, Brasil.

EPA@. <http://www.epa.gov/heatisland/mitigation/greenroofs.htm>. Acedido a 3 de Março de 2014.

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

Europeu, P. e Europeia, C. D. U. (2000). "Diretiva 2000/60/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Outubro de 2000 que estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da política da água". *Jornal Oficial da União Europeia*.

Evans, E., Ashley, R., Hall, J., Penning-Rowsell, E., Sayers, P., Thorne, C. e Watkinson, A. (2004). "Foresight. Future Flooding. Scientific Summary: Volume II Managing future risks". Office of Science and Technology, London.

I.G.P.A.A. <http://www.igespar.pt/pt/patrimonio/mundial/origemportuguesa/123/>. Acedido a 01 de Abril de 2014.

IPCC, (2000). "IPCC Special Report Emission Scenarios". Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC, (2007). "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability". Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC, (2013). "Climate change 2013. The Physical Science Basis". Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Leitão, J. P., Simões, N. E., Maksimovic, C., Ferreira, F., Prodanovic, D., Matos, J.S. e Sá Marques, A. (2010). "Real-time forecasting urban drainage models: full or simplified networks?". *Water Science & Technology*, v.62, n.9, 2106-2114.

Leitão, J. P., Matos, J. S., Prodanovic, D. e Maksimovic, C. (2008). "Modelos de simulação do escoamento superficial em meio urbano". 13º Encontro nacional de saneamento básico, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Leitão, J. P., Almeida, M. C., Simões, N. e Martins, A. (2013). "Methodology for qualitative urban flooding risk assessment". *Water Science Et Technology*, v.64, n.4, 829-838.

Lencastre, A. e Franco, F.M. (2003). " Lições de Hidrologia", 3ª Edição, Gráfica de Coimbra.

Lima, H. M., Silva, E. S. e Raminhos, C. (2006). "Bacias de retenção para gestão do escoamento: métodos de dimensionamento e instalação". *Revista escola de Minas*, v.59, n.1, 97-109.

Lima, M. I. P., Santo, F.E., Cunha, S. e Silva, Á. (2013). "Riscos Naturais, Antrópicos e Mistos. Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo". Parte 2A, pag. 325-337, Departamento de Geografia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Lope, C. M., Alonso-Muñoyerro, J. M., Ruggeroni, J., Rodriguez, J., González, F e Treviño, A. (2005). "Evaluación preliminar general de los impactos en España por efecto del cambio climático". Proyecto ECCE, Ministerio de Medio Ambiente e Universidad de Castilla-La Mancha.

Machado, F. (2013). "Modelação Hidráulica de Sistemas de Drenagem Sustentável ". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Mailhot A. e Duchesne S. (2010). "Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change". *Journal of water resources planning and management*, v.136, n.2, 201-208.

Mark, O., Svensson G., König, A. e Linde, J.J. (2008). "Analyses and Adaptation of Climate Change Impacts on Urban Drainage Systems". 11<sup>th</sup>International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

Marques, A. S., Lima, J., Sousa, J., Simões, N. e Pina, R. (2013). "Sistemas de drenagem de águas pluviais". ERSAR, Lisboa.

Matias, M.G.B. (2006). "Bacias de retenção. Estudo de Métodos de dimensionamento". Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto.

Muñoz, A.H., Lehmann, A.H. e Martínez, P.G. (2004). "Manual de depuración de Uralita: Sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes". Paraninfo, Madrid.

Neves, M. P., Villanueva, A.O.N. e Tucci, C. (2001). "Simulação Hidrodinamica Integrada do Escoamento em Redes de Drenagem Urbanas e nas Ruas". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.6, n.3, 111-139.

---

Paulino, J. e Santos, E. (2013). "Relatório de Progresso da Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas". APA, Amadora, Portugal.

Peak A., Prodanovic P., Simonovic, P.P. (2013). "Rainfall Intensity Duration Frequency Curves Under Climate Change: City of London, Ontario, Canada". *Canadian Water Resources Journal*, v.37, n.3, 177-189.

Pompêo, C. A. (2000). "Drenagem Urbana Sustentável". *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.5, n.1, 394-401.

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

RGSPDADAR. Regulamento geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de água e de drenagem de águas residuais domésticas (1995). Decreto-Regulamentar nº 23/95, de 23 de Agosto – Lisboa: Imprensa Nacional, 1996.

Rodríguez, R., Navarro, X., Casas, M. C., Ribalaygua, J., Russo, B., Pouget, L. e Redaño, A. (2014). "Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain)". *International Journal of Climatology*, v.34, n.3, 643-654.

Santos, F. D. e Miranda, P. (2006). "Alterações Climáticas em Portugal Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação". Gradiva, Lisboa.

Santos, L.L. (2009). " Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações". *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.2, n.3, 01-19.

Schardong, A. e Simonovic, S. P. (2013). "Possíveis Impactos das Mudanças Climáticas em Curvas Intensidade Duração Frequência". XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos ABRH, Brasil.

SC@. <http://solucoesparacidades.com.br/saneamento/reservatorios-de-detencao/>. Acedido a 23 de Março de 2014.

Simões, N. E., Leitão, J. P., Pina, R., Sá Marques, J. A., Maksimovic, C. e Gonçalves, G. (2010). "Modelação Hidráulica de Inundações Urbanas. A Inundação de 9 de Junho de 2006 em Coimbra". 10º Congresso da Água - Marcas d'água, Algarve.

Silveira, C., Filho, F., Cabral, S., Lemos, W. e Porto, V. (2013). "Avaliação de desempenho dos modelos de mudança climática do CMIP5 quanto à representação da precipitação sobre as bacias do setor elétrico brasileiro no século XX e análise das projeções para o cenário RCP8.5". XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos ABRH, Brasil.

SM@. <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=324731&page=2>. Acedido a 20 de Maio de 2014.

Sousa, E. R. (2001). "Sistemas de drenagem de águas residuais e pluviais". Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, IST/UTL, Lisboa.

Tucci, C. (2005). "Gestão das Inundações urbanas". GWP, Porto Alegre, Brasil.

Willems, P., Olsson, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Beecham, S., Pathiara, A., Bülow Gregersen, I., Madsen, H. e Nguyen, V.T.V. (2012). "Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems". IWA Publishing, London.

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. e Shaffer, P. (2007). "The SuDS manual". Ciria, London.